

NN31050.90-2

stora

90-02

**Stortbaarheidscriteria
voor
zuiveringsslib**

32/1110 100 1/1

BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW

stora

postbus 80200, 2508 GE den haag
johan van oldenbarneveltlaan 5

☎ 070-3512710

stichting toegepast onderzoek reiniging afvalwater

Stortbaarheidscriteria voor zuiveringsslib



0000 0635 4944

13 OKT. 1993

Inhoud	I
Ten geleide	III
SAMENVATTING	1
1 INLEIDING	4
2 CONSISTENTIE VAN ZUIVERINGSSLIB	6
2.1 Algemeen	6
2.2 Stortdoel	6
2.3 Stortmethodiek	6
2.3 Consistentie van zuiveringsslib in relatie tot het storten van zuiveringsslib	7
2.5 Hypothetisch stortbaarheids criterium zuiveringsslib	10
3 KARAKTERISERING VAN DRAAGKRACHT EN STABILITEIT	11
3.1 Algemeen	11
3.2 Bouwfysische benadering	12
3.3 Bodemfysische benadering	12
3.4 Rheologische benadering	16
3.5 Grondmechanische benadering	19
4 SELECTIE VAN MEETMETHODEN EN -PRINCIPES	27
4.1 Inleiding	27
4.2 Criteria eerste selectie	27
4.3 Resultaten eerste selectie	28
4.4 Criteria en beoordeling van geselecteerde meetmethoden	31
4.5 Conclusies	32
5 EXPERIMENTEN	34
5.1 Uitgangsmaterialen	34
5.2 Toegepaste meetmethoden	34
5.3 Resultaten	34
5.4 Conclusies en aanbevelingen	42
6 CONSISTENTIE VAN ZUIVERINGSSLIB IN RELATIE TOT DE STORTMETHODIEK	46
6.1 Algemeen	46
6.2 Stabiliteitsfactor	46
6.3 Stabiliteit in relatie tot de stortmethode	47
6.4 Samenvatting en conclusies	48
7 STORTBAARHEIDSCRITERIA VOOR ZUIVERINGSSLIB	49
8 VERHOGING AFSCHUIFSTERKTE ZUIVERINGSSLIB	51
8.1 Methoden	51
8.2 Kosten	51
9 LITERATUUR	59

Bijlagen:

1. Stortmethoden	62
2. Grondmechanische meetmethoden	69
3. Meetresultaten	81
4. Meetvoorschrift	85

Ten geleide

Wanneer meer dan 10%, met polymeren ontwaterd, slib samen met vast afval wordt gestort, moeten aan het slib meer eisen worden gesteld dan in de richtlijn "gecontroleerd storten" zijn vervat. Naast het drogestofgehalte betreffen deze eisen de afschuifsterkte en de draagkracht van het slib.

Dit onderzoek geeft geen aanleiding om daarbij in Nederland af te wijken van de aanbevelingen van de Europese Gemeenschap in het kader van het COST 681-programma. Wel onderstreept het het belang van standaardisatie van methoden voor slibkarakterisering; voorschriften voor de bepaling van draagkracht en afschuifsterkte zijn als bijlagen bij dit rapport gegeven.

Het onderzoek werd op aanbeveling van de Onderzoekadviescommissie* door het algemeen bestuur van de STORA opgedragen aan Grontmij N.V. (projectleider drs. J.J. van den Berg) en namens de STORA begeleid door een commissie bestaande uit ing. P.C.A.M. van Helvoort (voorzitter), ing. E.W. Hendriks, ir. H.H.M. Koppers, ir. E. van 't Oever en ing. W.G. Wiessner.

Den Haag, september 1990

De directeur van de STORA

drs. J.F. Noorthoorn van der Kruijff

*

De Onderzoekadviescommissie, die tot dit project adviseerde, bestond uit:
prof.ir. A.C.J. Koot (voorzitter), drs. J.F. Noorthoorn van der Kruijff (secretaris) en
ir. J. Boschloo, ir. R. den Engelse, prof.dr. P.G. Fohr, ir. A.E. van Giffen, ir. J.J.
de Graeff, dr.ir. P.J. Huiswaard, drs. S.P. Klapwijk, prof.ir. J.H. Kop, ir. Tj. Meijer,
ir. L.P. Savelkoul, dr.ir. D.W. Scholte Ubink, wijlen ir. H.M.J. Scheeltinga en ir. M.
Tiessens (leden).

SAMENVATTING

In Nederland wordt zuiveringsslib gestort te zamen met huishoudelijke afvalstoffen en bedrijfsafval. De gestorte stoffen worden gehomogeniseerd en gecompacteerd. De draagkracht van een stortlichaam moet zodanig zijn dat daarbij gebruikt materieel niet zal wegzakken. In het algemeen kan zuiveringsslib, dat na conditionering met polymeren is ontwaterd, onvoldoende weerstand bieden tegen afschuifkrachten. Het storten van zuiveringsslib kan derhalve aanleiding zijn voor een grondmechanisch instabiele toestand van het stortlichaam.

Gezocht is naar een objectieve maatstaf voor de stortbaarheid van zuiveringsslib op basis van de consistentie, waarbij die consistentie afhankelijk kan zijn van stortmethode en stortdoel. Het onderzoek richtte zich daarbij op:

- het begrip consistentie als stortbaarheidscriterium;
- methoden voor het meten van de consistentie van slibben;
- selectie van principes en methoden om de stortbaarheid van slib vast te stellen;
- experimenten met zuiveringsslib om de toepasbaarheid van de geselecteerde methoden te beoordelen;
- het afleiden van stortbaarheidscriteria voor zuiveringsslib;
- het verbeteren van de stortbaarheid van zuiveringsslib.

In Nederland, België en Duitsland worden bij het storten van slib te zamen met huishoudelijke afvalstoffen eisen gesteld aan zijn consistentie. Deze wordt daarbij uitgedrukt in het drogestofgehalte, al dan niet in combinatie met de schuifsterkte en/of de draagkracht. De praktijkervaringen geven aan dat men de "consistentie" van slib het best kan definiëren als die combinatie van stortbaarheidseigenschappen, waarin de invloed tot uiting komt op de grondmechanische stabiliteit en de draagkracht.

Het begrip consistentie wordt gehanteerd in de grondmechanica, de bodemkunde en de rheologie. Een algemene grondmechanische, bodemkundige of rheologische definitie van de gedragsvormen waarin zuiveringsslib kan voorkomen bestaat niet. De grondmechanica beschouwt zuiveringsslib, hoewel zeer heterogeen van samenstelling, als een fijnkorrelige cohesieve grondsoort met een hoog gehalte aan organische stof.

De meetmethoden voor "consistentie" zijn veelal gebaseerd op het vaststellen van fysische parameters onder gedefinieerde omstandigheden. Er zijn echter ook meetmethoden waarmee op empirische wijze een bepaalde eigenschap van het materiaal wordt vastgesteld; hierbij zijn de meetomstandigheden vaak slecht gedefinieerd, waardoor verschillen in meetuitkomsten niet kunnen worden verklaard. De grondmechanische meetprincipes en -methoden bieden de meeste mogelijkheden.

De consistentie en de fasen van cohesieve gronden kunnen veranderen door verandering in het watergehalte. De grenzen tussen de verschillende fasen worden bepaald door lutumgehalte, mineralogische samenstelling en organisch-stofgehalte.

De overgangen tussen de fasen verlopen niet abrupt, maar over een bepaald traject van het watergehalte. Voor het vaststellen van de consistentiegrenzen is de methode van Atterberg het meest geschikt.

De stabiliteit van cohesieve grondlichamen wordt bepaald door de samenhang van de gronddeeltjes (het korrelskelet) en de ongedraineerde schuifsterkte. Door bovenbelasting van cohesieve grond treden zettingen op waardoor een dichtere pakking van het materiaal ontstaat; deze consolidatie bepaalt in belangrijke mate de samendrukbaarheid c.q. de draagkracht. In Duitse onderzoeken is een relatie vastgesteld tussen de draagkracht en de ongedraineerde schuifsterkte. Een eenduidig verband tussen schuifsterkte en de droge stof kon daarbij echter niet worden vastgesteld.

Bij de beoordeling van mogelijke meetmethoden voor de consistentie en de stabiliteit van zuiveringsslib hebben bij een eerste waardering de waarde van de informatie, de nauwkeurigheid en het toepassingsgebied een rol gespeeld. De uiteindelijke selectie werd gemaakt op basis van de criteria: geschikt voor laboratorium of veld, gebruiksvriendelijkheid, tijdsduur van de meting, snelle informatie, robuustheid en kosten. De meetmethoden zijn beproefd met zeefbandpersslib, centrifugeslib, kamerfilterpersslib, natuurlijk ontwaterd slib en drinkwaterslib. Van deze slibben zijn de dichtheid, het drogestofgehalte, het organisch-stofgehalte, het lutumgehalte en in enkele gevallen de Atterbergse consistentiegrenzen bepaald.

Onderzocht zijn:

- voor het beoordelen van de stabiliteit:
 - vinsondeproef met de motorvinsonde en de handvinsonde;
 - valkegelproef met het valkegelapparaat;
 - rotatieviscositeitmeting;
- voor het beoordelen van de draagkracht de laststempelproef met het Hildesheimerprüfstempel;
- voor het beoordelen van de waterhuishouding de gravimetrische methode.

De experimenten en metingen geven aanleiding tot de volgende conclusies:

- de gangbare methode om "grond" te classificeren volgens de methode van Atterberg gaat niet op voor zuiveringsslib. Er is dus geen referentiekader voor metingen van afschuifsterkten van slib;
- de viscositeit van steekvaste slibben kan niet op eenvoudige wijze worden gemeten;
- de handvinsonde en de valkegel geven slecht reproduceerbare resultaten en zijn ongeschikt voor het bepalen van de afschuifsterkte van zuiveringsslib. De reproduceerbaarheid - en dus de betrouwbaarheid - van afschuifsterktes bepaald met de handvinsonde nemen toe, mits de monsternamen wordt uitgevoerd door een en dezelfde persoon. In de praktijk leidt dit tot te grote verschillen in waarneming; gebruik van de handvinsonde wordt derhalve afgeraden; alleen de motorvinsonde geeft redelijk tot goed reproduceerbare waarden bij een zorgvuldige monstervoorbereiding en wordt als methode aanbevolen;

- een lage afschuifsterkte betekent niet dat slib niet goed stortbaar zou zijn; evenmin houdt een hoge waarde in dat slib wel goed stortbaar is;
- de betekenis van de in het onderzoek gemeten waarden voor de stabiliteit en de draagkracht is relatief; voor het vaststellen van goed onderbouwde (grens)waarden zijn meer metingen van slibben nodig.

Voor stortlichamen opgebouwd uit huishoudelijke afvalstoffen wordt een stabiliteitsfactor 2,25 à 2,5 aanbevolen. Door het storten van zuiveringsslib neemt deze stabiliteitsfactor af. De mate waarin is - naast de consistentie van het slib - afhankelijk van de gevolgde stortmethoden. Bij een laagsgewijze inbreng van het slib in het stortlichaam is deze afname het grootst; bij de inbouw van het slib in pakketten is de invloed minder. De stabiliteit van het stortlichaam is niet constant en neemt af in de tijd als gevolg van biologische afbraakprocessen.

Richtwaarden voor afschuifsterkte en draagkracht worden bepaald door hun invloed op de grondmechanische stabiliteit en/of de draagkracht van het stortlichaam. Daarbij zijn stortmethode en lange-termijn-effecten van belang. Wanneer het aandeel zuiveringsslib in een stortlichaam ligt in de orde van grootte van 10 volumepercent, is de invloed van het zuiveringsslib op het draagvermogen en de grondmechanische stabiliteit van het stortlichaam gering. In deze situatie worden geen specifieke eisen aan het slib gesteld anders dan de normale eisen volgens de Richtlijn "Gecontroleerd Storten". Indien echter het aandeel zuiveringsslib in de dagelijkse aanvoer naar een stortplaats groter wordt, zullen aanvullende eisen ten aanzien van de afschuifsterkte moeten worden gesteld. In EG-verband uitgevoerd onderzoek beveelt aan dat gestort zuiveringsslib een afschuifsterkte van 15-20 kN/m² moet hebben. Dit houdt in dat op het moment van storten mogelijk een grotere afschuifsterkte dan 15-20 kN/m² moet worden vereist.

Voor de draagkracht kan op basis van dit onderzoek geen grenswaarde worden vastgesteld. Als richtwaarde wordt aanbevolen een maximale indringing van 5 mm te stellen bij een belasting van 50 kN/m² te meten met een laststempel.

In het algemeen kan worden geconcludeerd dat toeslagmaterialen die een wezenlijke toename van de afschuifsterkte in het slib bewerkstelligen, een min of meer reactief karakter moeten hebben.

Materialen zoals zand en zaagmeel bezitten deze eigenschappen niet of nauwelijks. Ook vliegassen afkomstig van poedergestookte installaties blijken slechts in grote hoeveelheden een significante toename van de afschuifsterkte te geven. Als deze stoffen alleen om deze reden aan het slib worden toegevoegd, zou het te storten volume sterk toenemen hetgeen niet wenselijk wordt geacht. Voor zover dergelijke stoffen al worden gestort, verdient het aanbeveling dit te zamen met zuiveringsslib te doen. De invloed van het zuiveringsslib op de grondmechanische stabiliteit en het draagvermogen van het stortlichaam nemen daardoor verder af.

INLEIDING

In het algemeen heeft zuiveringsslib, dat na conditionering met polymeren is ontwaterd, onvoldoende stevigheid om voldoende weerstand te bieden tegen afschuifkrachten. Bij het storten van zuiveringsslib kan dit aanleiding geven tot een grondmechanisch instabiele toestand van het stortlichaam. Afhankelijk van de hoeveelheid slib en de wijze waarop het slib in een stortlichaam wordt verwerkt, kan het slib als een ononderbroken laag aanwezig zijn. Dergelijke sliblagen kunnen - mede door de vochtbindende eigenschappen van het slib - de grondmechanische stabiliteit van het stortlichaam beïnvloeden. Bovendien zijn dergelijke sliblagen slecht doorlatend voor water en/of gas, zodat ophopingen kunnen ontstaan die weer van invloed kunnen zijn op de grondmechanische stabiliteit.

In Nederland wordt zuiveringsslib gestort te zamen met huishoudelijke afvalstoffen en daarmee te verwerken bedrijfsafval. De gestorte afvalstoffen worden gehomogeniseerd en gecompacteerd met behulp van zogenaamde compactoren. De draagkracht van zuiveringsslib is als zodanig klein waardoor het materieel kan wegzakken in gestort zuiveringsslib.

Geconditioneerd en ontwaterd slib vertoont de tendens zich aan andere stoffen te hechten, afhankelijk van de belasting die er op dat moment op wordt uitgeoefend. Wanneer een compactor over gestort zuiveringsslib rijdt, wordt het slib vaak onder de wielen vandaan geperst waarna het aan de zijkanten van de wielen blijft kleven.

Het storten van zuiveringsslib is dus van invloed op de grondmechanische stabiliteit en de draagkracht van een stortlichaam. Gezocht is naar een objectieve maatstaf voor stortbaarheid op basis van consistentie waarbij eisen aan consistentie afhankelijk kunnen zijn van de te gebruiken stortmethode en het stortdoel.

Het onderzoek heeft zich gericht op:

- het voorkomen van dit begrip als stortbaarheids criterium; zo mogelijk in relatie tot stortdoel en stortmethode. In hoofdstuk 2 zijn de resultaten weergegeven. De inventarisatie leidt tot een definiëring van het begrip consistentie van zuiveringsslib als stortbaarheids criterium;
- het inventariseren van methoden voor het meten van de consistentie van slibben of soortgelijke methoden. Deze inventarisatie is weergegeven in hoofdstuk 3; de selectie van meetprincipes en -methoden. Deze selectie, weergegeven in hoofdstuk 4, heeft na evaluatie geresulteerd in de keuze van meetmethoden die mogelijk geschikt zijn om de consistentie van zuiveringsslib vast te stellen;
- het uitvoeren van experimenten om een indruk te krijgen van de toepasbaarheid van de geselecteerde meetmethoden op zuiveringsslib (hoofdstuk 5);
- de betekenis van de gemeten waarden voor de stortmethode. In hoofdstuk 6 wordt ingegaan op de berekening van de stabiliteit van een stortlichaam op basis van de gemeten consistentie in relatie tot de stortmethodiek;

het formuleren van stortbaarheidscriteria voor zuiveringsslib;
het verbeteren van de stortbaarheid van zuiveringsslib. In hoofdstuk 8 wordt een overzicht gegeven van de haalbare consistentie van zuiveringsslib na conditioneren en ontwateren. Door het toevoegen van toeslagstoffen kan de consistentie worden verbeterd. Een indicatie wordt gegeven van de kosten die dit met zich meebrengt.

2 CONSISTENTIE VAN ZUIVERINGSSLIB

2.1 Algemeen

Voor een definitie van het begrip consistentie is globaal gezocht naar het voorkomen van dit begrip of van andere toegepaste stortbaarheids-criteria -zo mogelijk in relatie tot stortdoel en stortmethode- in Nederland, België, Bondsrepubliek Duitsland, Zwitserland, Frankrijk, Verenigd Koninkrijk en de Verenigde Staten van Amerika.

Voor zover ervaringen met stortcriteria bekend zijn, zijn deze opgenomen in dit rapport. Zijn ervaringen niet bekend, dan is daarvan de reden aangegeven.

2.2 Stortdoel

Zuiveringsslib wordt gestort om het definitief te verwijderen; het slib wordt dus niet meer op een of ander wijze (her)gebruikt.

Bij het storten van zuiveringsslib wordt, in ieder geval in Nederland, onderscheid gemaakt tussen:

- zonder meer storten;
- storten met als doel het tussentijds afdekken van het stortfront of de gestorte lagen afval ter beperking van stankoverlast, overlast door vogels en insecten;
- storten met als doel eindafdekking van een stortlichaam. In dat geval worden, in verband met de uitloogbaarheid en de uitspoeling van het slib, kwaliteitseisen aan het slib gesteld (zware metalen).

2.3 Stortmethodiek

De stortmethoden kunnen worden onderscheiden in:

- het storten in monodeponie; dat wil zeggen dat alleen zuiveringsslib wordt gestort;
- het storten van zuiveringsslib op een stortplaats voor huishoudelijke afvalstoffen en daarmee te verwerken bedrijfsafval.

Voor de verwerking van zuiveringsslib op een stortplaats voor huishoudelijke afvalstoffen worden in de literatuur^{2,6} de volgende werkwijzen aangegeven:

- aanbrengen van slib in pakketten in het huishoudelijk afval;
- aanbrengen van slib in lagen van 0,5 m tot 1 m dikte waarna huishoudelijk afval wordt opgebracht. De totale dikte van huishoudelijk afval en slib bedraagt 2 m;
- aanbrengen van slib in dunne lagen van 0,05 tot 0,10 m, waarna huishoudelijk afval wordt opgebracht tot een totale dikte van 0,5 m is bereikt;
vooraf mengen van slib en huisvuil waarna verwerking in het stortlichaam.

Een meer uitgebreide omschrijving van de stortmethoden is weergegeven in bijlage 1.

2.4 Consistentie van zuiveringsslib in relatie tot het storten van zuiveringsslib

Nederland

Uitgangspunten voor het storten van zuiveringsslib zijn de Richtlijn "Gecontroleerd Storten" en de Richtlijn voor de inhoud van de provinciale plannen voor de verwijdering van zuiveringsslib. Deze richtlijnen zijn vastgesteld op basis van de Afvalstoffenwet. Aan te storten zuiveringsslib worden landelijk vaak de volgende eisen gesteld:

- het slib dient steekvast te zijn met een drogestofgehalte van minimaal 35%. Regionaal kan hier een eigen interpretatie aan worden gegeven;
- ter voorkoming van stankhinder dient het slib gestabiliseerd te zijn.

De uitvoering van de Afvalstoffenwet is opgedragen aan de provincies die, via het Provinciaal Afvalstoffenplan, aanvullende eisen kunnen stellen aan het te storten zuiveringsslib.

Door middel van een enquête onder stortbeheerders en waterkwaliteitsbeheerders is getracht inzicht te krijgen in de ervaringen met het storten van zuiveringsslib en eisen voor stortbaarheid. De resultaten kunnen als volgt worden samengevat:

Bij de keuze van een stortplaats laat men zich in het algemeen leiden door logistieke overwegingen. Afhankelijk van de eisen die de stortplaatsbeheerder stelt, wordt een bepaalde ontwateringstechniek voor het te storten zuiveringsslib toegepast. Filterperskoeken kunnen daarbij in het algemeen zonder enige praktische problemen worden gestort. Zuiveringsslib dat is geconditioneerd met polyelectrolyten en vervolgens is ontwaterd, levert in het algemeen problemen op bij de verwerking in het stortlichaam (slechte menging, aanhechting en berijdbaarheid). In het algemeen wordt steekproefsgewijs het drogestofgehalte en de gloeirest van het te storten zuiveringsslib vastgesteld. Incidenteel wordt (in situ) de afschuifsterkte gemeten.

Door de stortbeheerders worden in het algemeen geen specifieke stortmethodieken toegepast. De gevolgde stortmethode wordt ad hoc bepaald, afhankelijk van het totale aanbod van afvalstoffen. Het komt in de praktijk voor dat zuiveringsslib tijdelijk wordt geweigerd als het aanbod van het te storten slibvolume "niet in verhouding staat" tot het volume van de overige te storten afvalstoffen. In de praktijk worden door de leverancier van het slib en de beheerder van de ontvangende stortplaats afspraken gemaakt over de maximale (dag)aanvoer van het slib.

België

Zuiveringsslib mag alleen worden gestort op stortplaatsen waar ook huishoudelijke afvalstoffen worden gestort. Verwacht wordt dat in de komende jaren 10.000 tot 15.000 ton droge stof per jaar zal worden gestort. Als eis aan de consistentie wordt gesteld dat het te storten zuiveringsslib steekvast moet zijn en een drogestofgehalte moet hebben van 35% (steekproefsgewijs vast te stellen).

De ervaringen met het storten van zuiveringsslib stemmen overeen met die in Nederland.

Bondsrepubliek Duitsland

In de Bondsrepubliek Duitsland is geen federale richtlijn van kracht voor de stortbaarheid(parameters) van zuiveringsslib. Door enkele deelstaten (Baden-Württemberg, Nedersaksen) worden wel stortbaarheids-criteria aangehouden.

Tot op heden wordt in de meer zuidelijke deelstaten van de Bondsrepubliek relatief weinig zuiveringsslib gestort door de aanwezigheid van voldoende landbouwkundige hergebruiksmogelijkheden. In de noordelijke deelstaten is een met Nederland vergelijkbare situatie; een overschot aan dierlijke meststoffen, zuiveringsslib en andere afvalstoffen die in potentie voor landbouwkundig hergebruik geschikt zijn. De Duitse stortbaarheidsparameters zijn:

- watergehalte van het te storten zuiveringsslib maximaal 65%;
- voldoende stabilisatie ter voorkoming van stankhinder.

De ervaringen in Duitsland met het gezamenlijk storten van huishoudelijke afvalstoffen en zuiveringsslib zijn vergelijkbaar met de Nederlandse. Het betreft hier veelal stortplaatsen voor de berging van afvalstoffen van middelgrote gemeenten (tot ongeveer 70.000 inwoners). Grotere gemeenten hebben in het algemeen een relatief groot aanbod van andere afvalstoffen (as van verbrandingsovens, bouw- en sloopafval) waardoor het verwerken van slibben in het stortlichaam minder problemen oproept.

Van tenminste twee stortplaatsen is bekend dat, door onvoldoende grondmechanische stabiliteit, afschuiving van het talud van stortlichamen heeft plaatsgevonden.

In een aantal gevallen -met name daar waar oorspronkelijk gesloten stortplaatsen weer werden geopend voor het bergen van slibben- is geconstateerd dat zowel de oorspronkelijke draagkracht als de grondmechanische stabiliteit van het stortlichaam was afgenomen. Dit heeft geleid tot een slechte berijdbaarheid (draagkracht) en het afschuiven van taluds. Mede naar aanleiding hiervan is een onderzoek gestart naar het formuleren van voorwaarden voor de consistentie van te storten zuiveringsslib. Met de consistentie van het slib wordt bedoeld de grondmechanische stabiliteit -uit te drukken als de schuifsterkte- en de draagkracht van het slib.

Dit onderzoek¹⁴ heeft geresulteerd in het formuleren van een hypothetisch stortbaarheids criterium voor zuiveringsslib:

"te storten zuiveringsslib moet een ongedraineerde schuifsterkte hebben van 10 kN/m^2 en dus een drogestofgehalte van 35%".

Men heeft in deze hypothese aangenomen dat de draagkracht daarbij impliciet van de schuifsterkte afhangt.

In Nedersaksen⁸ wordt bovendien voor alle te storten afvalstoffen een draagkrachtcriterium aangehouden: te storten afvalstoffen mogen bij een belasting van 50 kN/m^2 door een laststempel -met een oppervlak van 2 cm^2 - maximaal 5 mm worden ingedrukt.

Zwitserland

De Zwitserse situatie is moeilijk te vergelijken met die in Nederland, België en Duitsland²². Veel slib wordt geëxporteerd en momenteel wordt het merendeel van het zuiveringsslib verbrand. Er zijn geen normen voor het storten van zuiveringsslib. Het storten van vloeibaar slib is verboden en voor zover slib wordt gestort, moet dit steekvast zijn. Controle daarop wordt niet/nauwelijks uitgevoerd.

Doordat in natuurlijke bekkens in het terrein wordt gestort, is geen ervaring opgedaan met de grondmechanische stabiliteit. Mede in verband met het cultiveren van de stortplaatsen, vindt onderzoek plaats naar de draagkracht en de berijdbaarheid. Het betreft hier voornamelijk oudere stortplaatsen waarbij het stortlichaam een diepte heeft van ongeveer 10 tot 15 m.

Frankrijk

In Frankrijk wordt alleen in de noordelijke en meer geïndustrialiseerde streken zuiveringsslib gestort. In het zuiden wordt veel zuiveringsslib gebruikt als bodemverbeteraar -na natuurlijke ontwatering of compostering- als onderhoudsmeststof -natte afzet- en voor het cultiveren van grond. Waar zuiveringsslib niet direct kan worden hergebruikt, wordt het merendeels verbrand in de ovens van de cementindustrie.

Voor zover slib wordt gestort, dient het een minimaal drogestofgehalte van 25% te hebben. Er worden geen nadere voorwaarden aan de consistentie gesteld. Problemen met het storten van zuiveringsslib zijn niet bekend.

Verenigd Koninkrijk

Recent (1989) is men in het Verenigd Koninkrijk overgegaan tot het storten van zuiveringsslib. Tot op heden wordt een belangrijk deel van de slibproductie toegepast als bodemverbeteraar en onderhoudsmeststof. Daarnaast wordt slib in toenemende mate gebruikt als groeimedium in de bosbouw. Naast hergebruik wordt zuiveringsslib in zee gestort (tot het jaar 2000) en voor een gering deel verbrand.

De enige problemen met de verwerking van zuiveringsslib op stortplaatsen betreffen de voormalige stortplaats van de stad London.

Bij de herinrichting van deze stortplaats als recreatiepark werd men geconfronteerd met grondmechanische instabiliteit van het stortlichaam, mogelijk veroorzaakt door de aanwezigheid van grote hoeveelheden slib. Het was overigens niet bekend of het hierbij zuiveringsslib betrof.

Het onderzoek in het Verenigd Koninkrijk spitst zich op dit moment toe op de bedrijfsvoering en de inrichting van stortplaatsen voor het storten van huishoudelijke afvalstoffen en zuiveringsslib. Op grond van voorlopige resultaten is er een tendens om het storten van niet ontwaterd zuiveringsslib te verbieden.

Door de huishoudelijke afvalstoffen vooraf samen te persen in balen en deze balen vervolgens te stapelen met kleine tussenruimten, tracht men de gas- en waterhuishouding van het uiteindelijk gevormde stortlichaam te optimaliseren. Onderzoek naar fysische stortbaarheidsparameters van zuiveringsslib ligt niet in het voornemen.

Verenigde Staten van Amerika

Door de sterk variërende bevolkingsdichtheid zijn er concentratiegebieden waar grote hoeveelheden zuiveringsslib ontstaan. Alleen in deze gebieden wordt het slib of verwerkt tot bijvoorbeeld compost of vernietigd (verbrand) of gestort in monodeponie in voormalige dagbouwmijnen. De met zuiveringsslib volgestorte mijnen worden ingezaaid waarna de natuurlijke processen geacht worden voor de rest te zorgen.

Er zijn geen ervaringen bekend met het storten van zuiveringsslib op stortplaatsen voor de berging van huishoudelijke afvalstoffen; het gezamenlijk storten van slib en huisvuil in grote hoeveelheden komt niet of nauwelijks voor.

2.5 Hypothetisch stortbaarheids criterium zuiveringsslib

Uit de inventarisatie van stortbaarheids criteria blijkt dat voor het storten van zuiveringsslib voor een deel gebruik wordt gemaakt van monodeponieën; voor het merendeel wordt het slib echter gestort te zamen met huishoudelijke afvalstoffen.

De praktijkervaringen met het storten van zuiveringsslib te zamen met huishoudelijke afvalstoffen zijn in Nederland, België en Duitsland vergelijkbaar. In deze landen worden aan de consistentie van het te storten zuiveringsslib eisen gesteld. De consistentie wordt daarbij verondersteld te worden gekarakteriseerd door het drogestofgehalte al dan niet in combinatie met de schuifsterkte en/of de draagkracht. Hoewel de aanhechting van zuiveringsslib bij de verwerking als hinderlijk wordt ervaren, wordt deze eigenschap van ondergeschikt belang geacht en niet als beperkend ervaren voor het storten van zuiveringsslib.

Op basis van het bovenstaande kan men "consistentie" van zuiverings-slib definiëren als die combinatie van stortbaarheidseigenschappen, waarin de invloed tot uiting komt op:

- de grondmechanische stabiliteit en de bijdrage aan de grondmechanische stabiliteit van een stortlichaam;
- de draagkracht en de bijdrage aan de draagkracht van een stortlichaam.

Daarnaast kan het vermogen tot aanhechting of kleef van zuiveringsslib aan andere materialen worden beschouwd als een factor die mede van invloed is op de verwerking van zuiveringsslib op een stortplaats.

3 KARAKTERISERING VAN DRAAGKRACHT EN STABILITEIT

3.1 Algemeen

Uitgaande van de formulering voor de consistentie van zuiveringsslib zijn de methoden geïnventariseerd voor het meten van die consistentie van slibben of soortgelijke materialen. Dergelijke meetmethoden zijn in het algemeen gebaseerd op het vaststellen of karakteriseren van de gedragsvorm van materialen.

Een algemene grondmechanische, bodemkundige of rheologische¹² definitie van de gedragsvormen waarin zuiveringsslib kan voorkomen bestaat niet. In de literatuur^{3,9} worden aan slib de volgende gedragsvormen toegekend:

- vloeibare toestand;
- plastische toestand;
- waterverzadigde vaste of halfvaste toestand;
- niet waterverzadigde vaste toestand.

De vloeibare toestand laat zich omschrijven met het verschijnsel dat het slib onder invloed van de zwaartekracht kan stromen.

Bij de plastische toestand kan een toestand worden onderscheiden waarbij het slib zich onder invloed van een aangelegde kracht laat deformeren zonder merkbare volumeverandering en zonder zichtbare verschijnselen als barsten of scheuren en een toestand waarbij de vervorming weer verdwijnt als de aangelegde spanning wordt opgeheven (elastische toestand).

De halfvaste toestand laat zich omschrijven als een toestand waarbij volumevermindering kan optreden als het water daaruit wordt afgevoerd bijvoorbeeld door verdamping.

In de vaste toestand treedt geen volumeverandering meer op als gevolg van verdergaande ontwatering (droging).

In de bodem(natuur)kunde^{5,21} wordt voor bepaalde grondsoorten vaak het begrip "consistentie" gehanteerd: de adhesie tussen de korrels waaruit een grond is opgebouwd. De samenhang tussen de bestanddelen van een bodem is daarbij afhankelijk van de organische stof, de korreldichtheid en het watergehalte.

Behalve in de bodemkunde en de grondmechanica wordt ook in andere vakgebieden het begrip consistentie gehanteerd; dit zijn ondermeer de rheologie en de bouwfysica.

De rheologie -die is gericht op karakteriseren van de gedragsvormen van materialen met plastische en elastische eigenschappen- wordt veel toegepast in de voedingsmiddelentechnologie.

In de bouwfysica worden (de uitstroming van) cementspecies en betonmengsels vaak gekarakteriseerd door middel van relatief eenvoudige meetmethoden. Deze meetmethoden zijn vaak op empirische wijze ontwikkeld en niet theoretisch onderbouwd.

In dit rapport worden de gangbare theorieën en meetmethoden slechts globaal genoemd voor zover zij een bijdrage leveren aan de onderbouwing of karakterisering van de (geformuleerde) consistentie van zuiveringsslib.

3.2 Bouwfysische benadering

3.2.1 Meetmethoden in de betontechnologie

In de betontechnologie heeft men behoefte aan een maat voor de verwerkbaarheid van betonspecie. De zetmaat, de verdichtingsmaat en de schudmaat zijn op empirische wijze bepaalde grootheden voor de verwerking van specie. Er bestaat geen vastgestelde relatie tussen bovengenoemde grootheden en de afschuifweerstand. Voor de verwerkbaarheid van plastische tot dik vloeibare species is de zetmaat een bruikbare meetmethode. De verdichtingsmaat is geschikt voor aardvochtige tot halfplastische species. De schudmaat is toepasbaar op half-plastische en vloeibare species.

3.2.2 Meetmethoden in de keramische industrie

Ten behoeve van het vaststellen van de consistentie van een kleimassa ontwikkelde Pfefferkorn begin deze eeuw een meetmethode die bekend staat als de Pfefferkornproef¹. Deze proef wordt uitgevoerd met een zogenaamd Pfefferkornapparaat. Met dit apparaat wordt een cilindrisch kleimonster (diameter 33 mm, hoogte 40 mm) onderworpen aan een stuikproef. Door middel van deze proef wordt de schuifweerstand van kleimassa's vastgesteld.

3.3 Bodemfysische benadering

3.3.1 Inleiding

Lagen zuiveringsslib in een stortlichaam kunnen de water- en gashuishouding beïnvloeden, waarbij moet worden gedacht aan het zijdelings uittreden van percolatiewater langs stagnante sliblagen en aan gasophoping onder de sliblagen.

Deze aspecten kunnen de stabiliteit en de berijdbaarheid van een stortlichaam negatief beïnvloeden.

De waterhuishouding, gasophoping, stabiliteit en berijdbaarheid zijn naast stortmethodiek, stortvorm en laagafmetingen afhankelijk van de slibeigenschappen, zoals het vochtgehalte (c.q. drogestofgehalte), de dichtheid en de doorlatendheid.

In de bodemfysica worden de volgende begrippen gebruikt:

dichtheid

Onder de dichtheid ρ wordt de verhouding verstaan tussen de bij 105°C gedroogde massa en het volume.

In de bodemfysica wordt onderscheid gemaakt tussen de dichtheid van de vaste fase en de dichtheid van de bodem met zijn natuurlijke structuur, dus met inbegrip van de holten tussen de vaste fase.

vochtgehalte

Het vochtgehalte is hier een maat voor de aanwezige hoeveelheid water per eenheid bodemmassa of bodemvolume. Het vochtgehalte kan worden uitgedrukt als relatief gewicht of relatief volume.

waterdoorlatendheid

De doorlatendheid is een evenredigheidsconstante K (m/s) in de wet van Darcy. Deze wet geeft de relatie tussen de stromingssnelheid van water (q in m^3/m^2s) en de gradiënt van de totale energietoestand (dH/dz):

$$q = -K \cdot \frac{dH}{dz}$$

K is karakteristiek voor iedere materiaalsoort.

Onderscheid wordt gemaakt in $K_{(verz)}$ en $K_{(onverz)}$ voor verzadigde respectievelijk onverzadigde condities. Voor onverzadigde grond neemt K toe naarmate het watergehalte hoger is.

Vanwege het hydrofiele karakter van zuiveringsslib wordt op het bepalen van $K_{(onverz)}$ hier niet verder ingegaan. Aangenomen wordt dat in zuiveringsslib sprake is van verzadigde stroming.

gasdoorlatendheid

De gasdoorlatendheid is K_a gedefinieerd als de evenredigheidsconstante in de wet van Darcy, die de relatie weergeeft tussen de stroming van lucht of gas door een vaste fase en de drukverschillen:

$$q = K_a \cdot \frac{dp}{dx}$$

waarbij:

K_a	=	gasdoorlatendheid	(m^4/Ns)
q	=	stroomsnelheid	(m/s)
p	=	gasdruk	(N/m^2)
x	=	afstand	(m)

De formule stelt een ééndimensionaal model voor. In werkelijkheid zal de stroming meerdimensionaal zijn.

rijpingsfactor

Voor de volledigheid wordt hier ook het begrip rijpingsfactor toegevoegd. Deze zou bij de beoordeling van de verwerkbaarheid van slib mogelijk kunnen worden toegepast.

Het watergehalte alleen is geen goed criterium voor de mate van rijping, omdat het gehalte aan colloïdaal materiaal (vooral lutum en organische stof) ook een rol speelt. Daarom wordt het begrip rijpingsfactor (n -cijfer) gehanteerd. In formule:

$$n = \frac{A - p(100 - L - H)}{L + bH}$$

Hierin is:

- n = rijpingsfactor
- A = aantal grammen water per 100 gram droge stof
- L = aantal grammen lutum per 100 gram droge stof
- H = aantal grammen organische stof per 100 gram droge stof
- p = aantal grammen vocht, gebonden door 1 gram niet-collodidaal materiaal (dat wil zeggen droge grond minus lutum en organische stof)
- b = verhouding tussen het waterbindend vermogen van een bepaalde gewichtshoeveelheid organische stof en eenzelfde hoeveelheid lutum.

De factoren p en b zijn afhankelijk van de slibsamenstelling: b varieert van 3 voor Zuiderzeeslib tot 9 voor jong-mosveen. Veel gebruikte waarden voor p en b zijn respectievelijk 0,3 en 3,0.

Voor de indeling van slib naar rijpingsgraad wordt de volgende methode gehanteerd:

rijpingsfactor	n-cijfer
ongerijpt	>2,0
vrijwel ongerijpt	1,4 - 2,0
halfgerijpt	0,9 - 1,4
vrijwel gerijpt	0,5 - 0,9
gerijpt	<0,5

Tabel 1. Indeling van slib naar rijpingsfactor

3.3.2 Meetmethoden

Meten van vochtgehalte (gravimetrisch)

In de bodemfysica heeft men voor het meten van het vochtgehalte keuze uit verschillende bepalingsmethoden: gravimetrische methode, onderwaterweging, chemische methode, warmtegeleidingsvermogen, neutronenmethode en capacitieve vochtmeting.

Sommige methoden kunnen uitsluitend in het laboratorium worden toegepast (gravimetrische en onderwaterweging). De neutronenmethode vindt toepassing in het veld. De overige methoden kunnen zowel in het laboratorium als in het veld worden uitgevoerd.

Meten van de waterdoorlatendheid

In tabel 2 is een overzicht gegeven van diverse methoden ter bepaling van de waterdoorlatendheid. De methoden zijn onderverdeeld in methoden voor verzadigde en onverzadigde omstandigheden van het materiaal.

De bepalingen van de waterdoorlatendheid komen tot stand door meting in het laboratorium of meting in het veld (in situ-meting).

laboratoriummeting	veldmeting	
	boven de grondwater-spiegel	beneden de grondwater-spiegel
ringmonsters	gipskolom kubus drainkubus cilinder-permeameter dubbele buizen omgekeerde boorgaten-methode	boorgatenmethode piëzometer boorgat-pompproef viergatenmethode drainafvoer

Tabel 2. Overzicht van meetmethoden voor waterdoorlatendheid in verzadigde grond

Laboratoriummeting

Voor de bepaling van de waterdoorlatendheid in verzadigde grond onder laboratoriumomstandigheden is slechts één methode bekend, de meting aan ringmonsters. Hierbij wordt de waterdoorlatendheid (K_{verz}) in een verzadigde grond in horizontale of verticale richting bepaald. Deze methode is minder geschikt voor slecht doorlatende materialen zoals klei, veen en slib vanwege het tijdrovende karakter van de proef.

In-situ-meetmethoden

Bij in situ-meetmethoden wordt onderscheid gemaakt tussen metingen die boven en onder de grondwaterspiegel worden uitgevoerd. Ter hoogte van de grondwaterspiegel is de drukhoogte in het bodemwater atmosferisch ($h = 0$ cm). Beneden deze waterspiegel zijn alle poriën met water verzadigd en is de drukhoogte positief. Indien metingen boven de grondwaterspiegel worden uitgevoerd, zullen in het algemeen de monsters door toevoeging van water worden verzadigd. Vervolgens wordt de permeabiliteit bepaald.

Metingen boven de grondwaterspiegel

De gipskolommethode, de kubusmethode en de drainkubusmethode voor de bepaling van de permeabiliteit zijn relatief eenvoudig en met een redelijke reproduceerbaarheid uit te voeren.

De bepaling van de permeabiliteit door middel van een cilinderpermeameter of door middel van dubbele buismethode heeft een grote reproduceerbaarheid en is eveneens relatief eenvoudig uit te voeren.

De omgekeerde boorgatenmethode is niet geschikt voor grondsoorten met een hoge doorlatendheid en niet voor grondsoorten waar, door verstopping van poriën, de doorlatendheid wordt geminimaliseerd.

Metingen onder de grondwaterspiegel

De boorgatenmethode geeft geen reproduceerbare uitkomsten voor pasteuze grondsoorten waarbij versmering van het boorgat kan optreden; bijvoorbeeld voor grond die is opgebouwd uit meerdere verschillende dunne lagen en grond waar sprake is van kwelsituaties.

De piëzometermethode is gebaseerd op het meten van stijgsnelheden in een boorgat en neemt 1 tot 3 uur in beslag. Horizontale grondwaterstromingen beïnvloeden de nauwkeurigheid en de reproduceerbaarheid van de metingen.

De boorgatpompproef is tijdrovend omdat hier een constante wateronttrekking wordt gemeten. Er mogen geen storende bodemlagen in de bodem aanwezig zijn en het boorgat moet regelmatig van vorm zijn. Dezelfde bezwaren kleven aan de viergatenmethode.

Bij de drainafvoermethode vindt bepaling van de doorlatendheid plaats door meting gedurende een zekere tijd van de drainafvoer en de grondwaterstand.

3.4 Rheologische benadering

3.4.1 Algemeen

De wetenschap die zich bezighoudt met het onderzoek naar vormeigenschappen, is de rheologie, onder meer toegepast in de voedingsmiddelen-technologie, de betontechnologie en in de keramische industrie. Ook in de rheologie bestaan meetmethoden voor het kwantificeren van de consistentie van materialen.

De vorm- en vervormingseigenschappen worden daarbij in hoofdzaak bepaald door de viscositeit van een stof. Onderscheid kan worden gemaakt in een tijdelijke vervorming die zich herstelt als de aangelegde spanning wordt weggenomen en irreversibele afschuiving die in hoge mate wordt bepaald door de viscositeit van de stof.

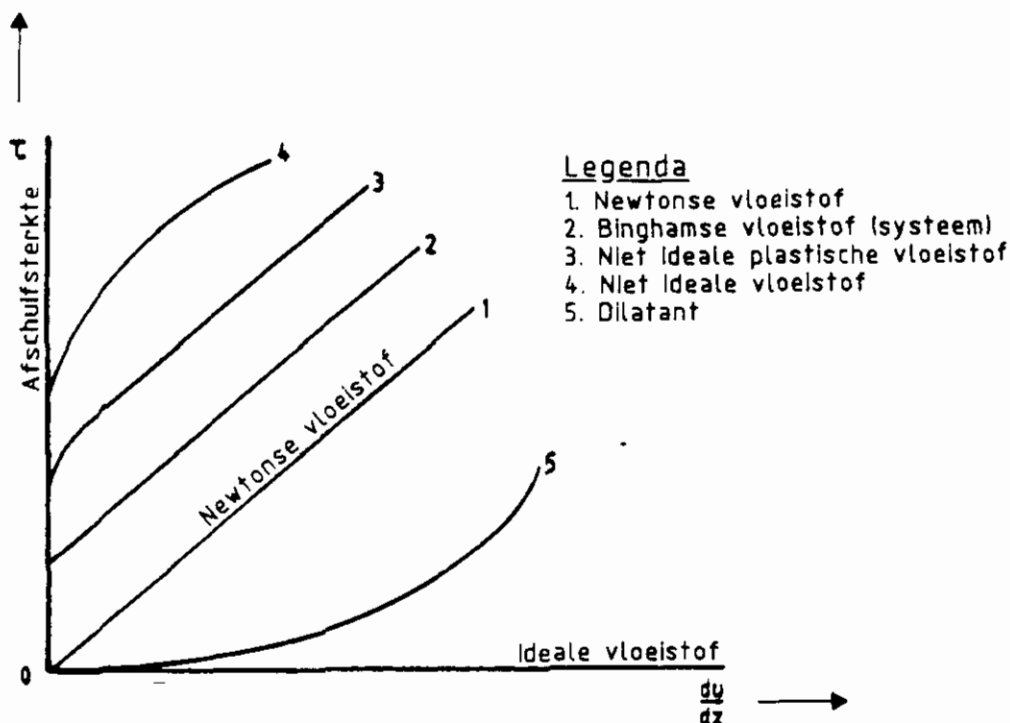
In de rheologie worden op basis hiervan gedragvormen van stoffen onderscheiden.

Voor een juist begrip van de vervormingseigenschappen moet inzicht bestaan in de dynamische en de kinematische viscositeit, de elasticiteitsmodulus van een stof en de glijdingsmodulus. De viscositeit is evenwel geen onder alle omstandigheden constante grootte. Bij sommige stoffen kan de viscositeit veranderen onder invloed van de optredende schuifsnellheid en/of de tijdsduur van een meting. De veranderlijke viscositeit, afhankelijk van de optredende schuifspanning noemt men schijnbare viscositeit; vervorming onder invloed van de tijdsduur van een vervormingskracht noemt men thixotropie.

3.4.2 Gedragvormen

Een produkt kan zich gedragen als een vaste stof, als een vloeistof of als een plastische stof.

Een vaste stof wordt gekenmerkt door een eigen vorm, elastisch gedrag, en het niet vertonen van vloeiverschuiven. Op een vaste stof is de wet van Hooke van toepassing. De viscositeit van een vaste stof is oneindig groot. (Zie figuur 1).



Figuur 1. Gedragvormen

Een vloeistof heeft geen eigen vorm en is niet samendrukbaar. Vloeistoffen hebben wel een viscositeit.

Indien de invloed van de viscositeit op de schuifspanning verwaarloosbaar is, spreekt men van non-viskeuze of Newtonse vloeistoffen. Worden echter de schuifspanningen verwaarloosd ($\tau = 0$) dan is ook de viscositeit nul en heeft men te doen met "ideale vloeistoffen". Ideale vloeistoffen bestaan in de praktijk niet.

Een plastische stof vertoont zowel elastische als niet-elastische gedragvormen. Bij geringe spanningen treden alleen elastische vormveranderingen op, die bij het wegnemen van de spanningen weer verdwijnen. Zijn de spanningen groter dan kunnen blijvende vervormingen optreden. Men zegt dat de stof zich viskeus gedraagt en spreekt van niet-Newtonse vloeistoffen.

Een ideale plastische stof, ook wel Binghamse-vloeistof genoemd, wordt gekenmerkt door een scherpe grens tussen de vastestoffase en de vloeistoffase. De schuifspanning waarbij deze overgang plaatsvindt heet zwichspanning.

Bij niet ideale plastische stoffen is sprake van geleidelijke overgang van vaste stof naar vloeistof in geval van toenemende belasting. Het overgangsgebied of vloeigebied wordt begrensd door de eerder genoemde zwichspanning (ook wel: onder-vloeigrens) en de bovenvloeigrens. Tussen de vloeigrenzen is sprake van een schijnbare viscositeit.

Stoffen waarbij de schuifspanning niet lineair toeneemt bij een toename van de snelheidsgradiënt noemt men dilatant.

3.4.3 Meetmethoden

De metingen en de daarvoor te gebruiken apparatuur zijn veelal gebaseerd op het vaststellen van fysische parameters onder gedefinieerde omstandigheden (rheologische meetmethoden).

Voor het meten van viskeuze eigenschappen, worden de meetmethoden ingedeeld naar het gedrag van de vloeistof. Geschikt voor Newtonse vloeistoffen zijn capillair- en kogelviscositeitmeters. De niet-Newtonse vloeistoffen worden gemeten met behulp van rotatieviscositeitmeters, waarmee de afschuifkracht of afschuifsnijheid kan worden geverifieerd.

De viscositeitmeters kunnen op basis van de uitvoering van meting in vier groepen worden ingedeeld:

- rotatie-viscositeitmeters;
- capillaire-viscositeitmeters;
- kogel-plaat-viscositeitmeters;
- viscositeitmeters waarbij gebruik wordt gemaakt van rollende of vallende kogels.

In de wegenbouw. Men vindt men onder andere in de beton- en staaltechnologie, evenals de praktijk aan wisselende belastingen worden blootgesteld. Toepassingen dynamische metingen worden vooral op die materialen toegepast, die in schuifspanning.

Bij dynamische metingen worden stoffen wisselend belast, waarbij wordt gekeken naar de verandering van gedragvorm. De groottheden die bij dynamische metingen worden gemeten of uit metingen worden afgeleid, zijn de elasticiteitsmodulus E , de dynamische viscositeit en de aangegane

afgeleide parameters E , η en σ_0 .

gevens worden verkregen over de relatieve kracht/vervorming en daaruit de Instron Universal Testing Machine. Met dit meetinstrument kunnen gegevens worden verkregen over de relatieve kracht/vervorming en daaruit afgeleide parameters E , η en σ_0 .

In de voedingsmiddelenindustrie maakt men onder andere gebruik van een meetmethode om de viskeuze karakter meer overzicht te krijgen. De meting geeft informatie over E , η en σ_0 .

sneller naarmate het viskeuze karakter meer overzicht te krijgen. De meting materiaal zal die kracht met een zekere snelheid afnemen en wel des te snante vervorming in de tijd in stand te houden. Bij viskeus-elastisch materiaal wordt de kracht gemeten die nodig is om een con

elastische component gemeten.

termaal vloeien. In het laatste geval wordt zowel een viskeuze als een materiaal zich als een vaste stof. Is de kracht groter, dan gaat het materiaal. Indien de kracht kleiner is dan de zwichtspanning gedraagt het materiaal. Hierdoor veroorzaakte vervorming wordt als functie van de tijd gemeten wordt een constante kracht uitgeoefend op het materiaal.

lus (E), de viscositeit (η) en de zwichtspanning (σ_0). Bij deze meting wordt een constante kracht uitgeoefend op het materiaal.

Bij kruipmeting wordt informatie verkregen over de elasticiteitsmodulus (E), de viscositeit (η) en de zwichtspanning (σ_0). Bij deze meting wordt een constante kracht uitgeoefend op het materiaal.

theoretisch onderbouwde meetmethoden worden onderscheiden naar informatiebehoefte. Te onderscheiden zijn kruipmeting, spanningrelaxatie, dynamische meting en viscositeitsmeting.

Er zijn echter ook meetmethoden waarmee op empirische wijze een bepaald de eigenschap van het materiaal wordt vastgesteld. Bij empirische methoden zijn de meetomstandigheden vaak onvoldoende gedefinieerd waardoor verschillen in meetuitkomsten niet kunnen worden verklaard. In het algemeen zijn dergelijke metingen echter eenvoudig en kunnen in een korte tijd worden uitgevoerd.

Empirische meetmethoden

Om snel een indruk te krijgen van bepaalde materiaaleigenschappen worden apparaten ingezet die slechts een selectie van parameters meten en vaak een specifieke toepassing hebben. De nauwkeurigheid van dergelijke meetmethoden is veelal niet erg groot; de reproduceerbaarheid echter wel. Een empirische meetmethode is bijvoorbeeld de zogenaamde penetratietest. Door middel van een pluiner die in het te onderzoeken materiaal wordt gestoken, kan de weerstand worden gemeten. Uit de gemeten weerstand kunnen voor sommige materialen de breuksterkte en de stevigheid worden afgeleid. Het referentiekader voor dergelijke metingen in een bepaalde stof, wordt in het algemeen empirisch bepaald.

Uit de literatuur zijn ook proeven bekend met de conus-(kegel) penetrometer voor het meten van de temperatuurinvloeden op de consistentie. Een dergelijk type meter is de kegelpenetrometer van Sommer en Runge. De kegel heeft een tophoek van 40° en een bepaald gewicht. Het gewicht kan verdubbeld of verdrievoudigd worden, waardoor de indringdiepte groter wordt.

Op de schaal van de penetrometer kan de indringdiepte worden afgelezen die als maat voor de stevigheid wordt gehanteerd.

Met de Posthumustrechter kunnen relaties worden bepaald tussen de kinematische viscositeit en de uitstroomtijd. De resultaten geven een indruk van de stromingseigenschappen van het materiaal.

De Posthumustrechter bestaat uit een cilinder van circa 10 cm met daaronder een trechter van circa 5 cm, die een doorstroomopening heeft die afhankelijk is van de te meten vloeistof (enkele millimeters).

Voor Newtonse vloeistoffen blijkt een lineair verband te bestaan tussen de kinematische viscositeit en de uitstroomtijd. Viskuze materialen laten echter een afwijkend gedrag zien als gevolg van de viscositeit, waarbij de weerstand tegen rekstroming vaak groter is dan de weerstand tegen afschuiving. Interpretatie van verschillende meetmethoden is door het ontbreken van gedefinieerde randvoorwaarden tijdens de metingen niet goed mogelijk.

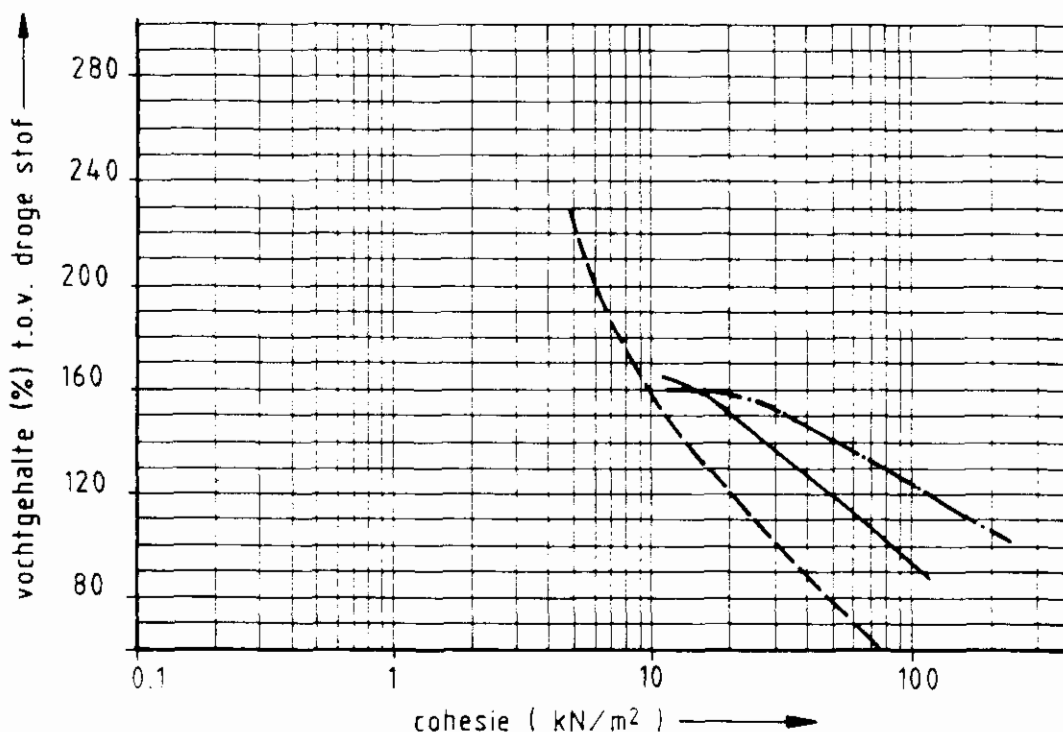
3.5 Grondmechanische benadering

Grondmechanica is de leer van de vervormingen en het evenwicht van grondlichamen. In grondmechanische berekeningen wordt de grond als een constructiemateriaal beschouwd, zij het met, ten opzichte van bijvoorbeeld beton en staal, sterk afwijkende sterkte- en stijfheidseigenschappen. Voor de bepaling van het materiaalgedrag zijn meetmethoden ontwikkeld, die zowel op natuurlijke als op geroerde en kunstmatig "ontstane" grondsoorten kunnen worden toegepast.

3.5.1 Cohesie/consistentie

Een eigenschap van grond is de mate waarin de korrels, waaruit de grond is samengesteld, samenhang of cohesie vertonen. De cohesie te zamen met de weerstand die geboden wordt tegen krachten die het korrelskelet trachten te vervormen of te doen bezwijken, wordt vaak de consistentie van grond genoemd.

De consistentie van cohesieve gronden zoals klei of silt, wordt gewoonlijk omschreven met termen als zacht, matig stijf, stijf of hard. Door Gay⁷ is de cohesie bepaald van een aantal verschillende slibsoorten als functie van het watergehalte van het slib. Op basis hiervan acht men een zekere cohesie in zuiveringsslib aanwezig.



Figuur 2. Cohesiekrachten in zuiveringsslib als functie van het watergehalte

Voor de beschrijving van de toestand van het zuiveringsslib volgens de grondmechanica wordt daarom als uitgangspunt aangenomen, dat zuiveringsslib, hoewel zeer heterogeen van samenstelling, kan worden beschouwd als een fijnkorrelige cohesieve grondsoort met een hoog gehalte aan organisch stof.

Cohesieve grondsoorten vertonen ook bij zeer lage waterspanningen en in vaste toestand een zekere samenhang.

Bij geroerde of verknede cohesieve gronden kan de consistentie veranderen door variatie van het watergehalte (w). Als bijvoorbeeld het watergehalte van een klei-slurry geleidelijk afneemt door een langzame uitdroging, gaat het materiaal van de vloeibare fase, via de plastische fase, over in de vaste fase. De grenzen tussen de verschillende fasen zijn afhankelijk van eigenschappen als lutumgehalte, mineralogische samenstelling en organisch-stofgehalte. Verder gebeurt de overgang van de ene fase naar de andere niet abrupt, maar verloopt deze over een bepaald traject van het watergehalte.

Elke methode om de consistentie-grenzen vast te stellen is in zekere zin subjectief.

In de praktijk heeft de methode van Atterberg het meeste nut bewezen, zodat deze algemeen wordt toegepast om grond op grondmechanische wijze te karakteriseren. De bijbehorende consistentiegrenzen worden ook wel Atterbergse grenzen genoemd.

Een ander kenmerk van cohesieve gronden is dat de sterkte- en de vervormingseigenschappen afhankelijk zijn van de snelheid van belasten. Bij een snelle belasting nemen vaak de waterspanningen toe en gedraagt de grond zich wrijvingsloos en vormbestendig. De dan aanwezige schuifsterkte is afhankelijk van het watergehalte waarbij verzadigd materiaal de laagste weerstand bezit. Bij een langzame belasting vertoont het materiaal een wrijvingsgedrag en kunnen relatief grote vormveranderingen optreden.

Voor de grondmechanische classificatie van het aangeboden materiaal zijn, naast de consistentie-grenzen, ook de textuur (korrelverdeling van het aggregaat) en het organisch-stofgehalte (H) van belang. Deze eigenschappen kunnen door middel van standaardproeven op grondmonsters worden bepaald.

3.5.2 Schuifsterkte

De stabiliteit van grondlichamen, zoals ophogingen of ingravingen, wordt bepaald door de schuifsterkte. Bij cohesieve gronden dient onderscheid te worden gemaakt tussen de effectieve sterkte-eigenschappen van het korrelskelet en de ongedraineerde schuifsterkte.

Tijdens een langzame belasting van de grond bepaalt de wrijving tussen de korrels de sterkte, zodat de normaalspanning op het schuifvlak van invloed is op de grootte hiervan.

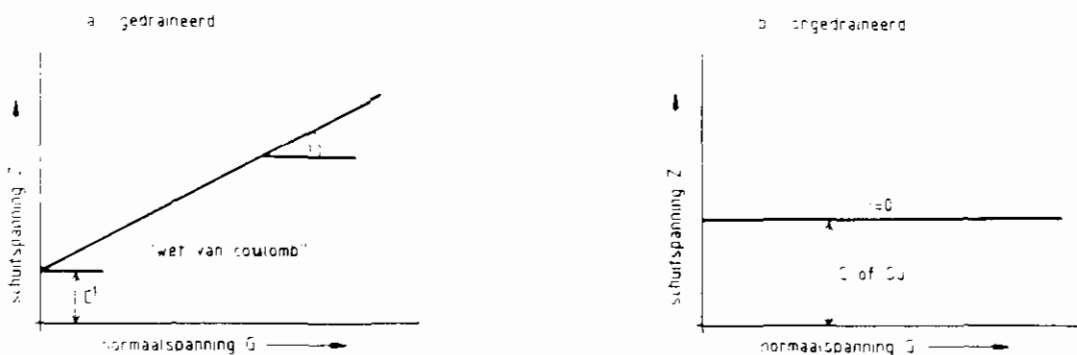
De wet van Coulomb die de relatie tussen de schuifsterkte en de normaalspanning weergeeft, luidt als volgt:

$$\tau_f = c' + \sigma' \operatorname{tg} \varphi'$$

Hierin is:

- τ_f = schuifspanning bij bezwijken of schuifsterkte (kN/m^2);
- c' = cohesie (kN/m^2);
- σ' = effectieve normaalspanning op het schuifvlak (kN/m^2);
- φ' = hoek van inwendige wrijving (graden).

De effectieve sterkte van grond wordt dus gekarakteriseerd door de parameters φ' en c' , die door middel van laboratoriumproeven kunnen worden bepaald. De wet van Coulomb is grafisch weergegeven in figuur 3.



Figuur 3. Relatie tussen schuifsterkte en normaalspanning

De ongedraineerde schuifsterkte, die een maat is voor de consistentie, kan door middel van laboratoriumproeven en/of veldmetingen worden bepaald.

De in de grondmechanica gebruikelijke consistentie-aanduiding voor cohesieve gronden luidt als volgt:

consistentie	ongedraineerde schuifsterkte kN/m^2
zeer zacht	< 12,5
zacht	12,5 - 25,0
matig stijf	25,0 - 50,0
stijf	50,0 - 100,0
zeer stijf	100,0 - 200,0
hard	> 200,0

Tabel 3. Consistentie-aanduiding

3.5.3 Samendrukbaarheid (consolidatie)

Bij belasting van fijnkorrelige, cohesieve gronden komen de zettingen slechts langzaam tot stand. De wateroverspanningen, die in eerste instantie ontstaan, moeten namelijk afnemen, voordat de korrelspanningen kunnen toenemen en het korrelskelet een dichtere pakking kan aannemen. Dit proces wordt consolidatie genoemd.

Behalve door bovenbelasting kan gestort slib ook volumeveranderingen ondergaan onder invloed van het eigen gewicht, door de verwerking of door uitdroging (verdamping).

Gay⁷ maakt het volgende onderscheid tussen de verschillende fasen in een consolidatieproces van een stortlichaam:

- korte-termijnzetting;
- consolidatie;
- lange-termijnzetting.

De korte-termijnzetting treedt onmiddellijk op na het aanbrengen van de belasting en is afhankelijk van het uittreden van lucht en het samenpersen van de korrelstructuur.

De consolidatie ontstaat door het aanbrengen van een uitwendige druk. Hierdoor ontstaat in de bodem een hydrostatische druk die een functie is van de waterverzadigingsgraad van de bodem en van de aangelegde spanning. Bij een volledig waterverzadigde bodem is de druk in de poriën gelijk aan de aangelegde druk. Indien door drainage water kan worden afgevoerd, zal de druk worden overgenomen door het korrelskelet. Dit gaat dus gepaard met een volumevermindering. Hoe sneller het water wordt afgevoerd, des te sneller de consolidatie optreedt.

De lange-termijnzetting stelt zich in als geen poriënwaterdruk meer aanwezig is. Dit zal dus het geval zijn na verloop van langere tijd als het stortlichaam in een biochemisch stabiele toestand komt te verkeren en de afbraakprocessen -waarbij water kan vrijkomen- zich nog maar zeer langzaam kunnen voltrekken. De lange-termijnzetting gaat gepaard met een verdere volumevermindering. Het consolidatiegedrag van zuiveringsslib is van invloed op de grondmechanische toestand van een stortlichaam. Onder invloed van de aangelegde spanningen zal het gestorte slib een deel van het water verliezen waardoor het volume afneemt.

De consolidatie van cohesieve grond kan worden berekend volgens de Wet van Terzaghi²⁰:

$$z = \frac{h}{C} \ln \left(\frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \right)$$

Hierin is:

- z = zetting (m);
- h = dikte van de samendrukbare laag (m);
- C = samendrukkingsconstante (dimensieloos);
- p₀ = verticale korrelspanning vòòr belasting (kN/m²);
- Δp = toename verticale korrelspanning (kN/m²).

De samendrukkingsconstante kan door middel van laboratoriumproeven worden bepaald waarna men theoretisch het tijd-zettingsverloop kan berekenen. Door Gay⁷ is onderzoek uitgevoerd naar het spannings-zettingsgedrag van met een zeefbandpers ontwaterd zuiveringsslib. De resultaten hiervan bevestigden dat het spannings-zettingsgedrag van zuiverings-slib vergelijkbaar is met dat van cohesieve gronden.

Hieruit mag echter niet worden afgeleid dat het zettingsgedrag van zuiveringsslib in een stortlichaam zonder meer met behulp van de wet van Terzaghi kan worden voorspeld. In de formule wordt namelijk verondersteld dat de samendrukbaarheidsconstante constant blijft zoals bijvoorbeeld in ontwateringsapparatuur. Het is echter aantoonbaar dat de samendrukbaarheidsconstante afhankelijk is van de effectieve spanning die wordt aangelegd. Dit betekent dat voor de voorspelling van het zettingsgedrag eerst de samendrukbaarheidsconstante van zuiveringsslib als functie van de aangelegde spanning en als functie van de tijd zou moeten worden bepaald.

De methode om een indruk van de samendrukbaarheid te verkrijgen is omslachtig. Daarnaast zou de relatie tussen de samendrukbaarheid en de draagkracht nog nader moeten worden onderzocht. Door Duitse onderzoekers^{14,8} is daarom gekeken naar een meer eenvoudige empirische meetmethode om de draagkracht van zuiveringsslib te karakteriseren. De samendrukbaarheid van de cohesieve grond en het daarmee vergelijkbare zuiveringsslib wordt daarbij verondersteld hetzelfde te zijn als de draagkracht. De draagkracht wordt daarbij vastgesteld aan de hand van de indringing van een laststempel in het zuiveringsslib. Deze methode is met name ontwikkeld voor het vaststellen van de draagkracht van met kalk geconditioneerd filterpersslib. De draagkracht van dergelijk slib wordt daarbij vergelijkbaar gesteld aan de draagkracht van zand. Op basis daarvan is als stortbaarheids criterium een grenswaarde gesteld van 5 mm indrukking bij een belasting van 5 N/m^2 door een laststempel met een oppervlak van 2 cm^2 .

3.5.4 Meetmethoden

Het meten van grondmechanische parameters zoals de schuifsterkte gebeurt in de praktijk onder geconditioneerde omstandigheden in een laboratorium of in het veld (in situ).

In het algemeen geldt dat de interpretatie van meetresultaten gerelateerd moet worden aan de grondmechanische classificatie van het materiaal, dat wil zeggen korrelverdeling, organisch-stofgehalte, watergehalte en de Atterbergse grenzen.

De methoden, die onder laboratoriumomstandigheden worden toegepast, meten de ongedraineerde en de gedraineerde schuifsterkte. De gedraineerde schuifsterkte kan worden bepaald door middel van:

- de directe schuifproef;
- de triaxiaalproef;
- de celproef.

De ongedraineerde schuifsterkte kan worden bepaald door middel van:

- de vrije prismaproef;
- de triaxiaalproef;
- de (motor)vinsondeproef;
- de val-kegelproef.

Verder kunnen worden bepaald de samendrukkingsconstante van grond door middel van de samendrukkingsproef en de draagkracht door middel van een laststempelproof. In het algemeen kan worden gesteld dat de monsterbehandeling voorafgaand aan de (laboratorium) meting van groot belang is.

Vaak bestaat de behoefte om in het veld een indruk te krijgen van één van de genoemde grondmechanische parameters zonder dat laboratoriumfaciliteiten beschikbaar zijn. Daarom wordt in het veld vaak gebruik gemaakt van meetmethoden die zijn afgeleid van laboratoriumapparatuur. Omdat geen monstervoorbehandeling kan plaatsvinden bij in-situ-metingen en geen grondmechanische karakterisering van het materiaal kan plaatsvinden, dienen in-situ-metingen in het algemeen alleen als indicatief te worden beschouwd.

De gedraineerde schuifsterkte kan niet in-situ worden bepaald. De ongedraineerde schuifsterkte kan worden bepaald door middel van een (hand)vinsonde - vergelijkbaar met de (motor)vinsonde, die onder laboratoriumomstandigheden kan worden toegepast - en op indirecte wijze door middel van een handsondering.

De meetmethoden zijn beschreven in bijlage 2.

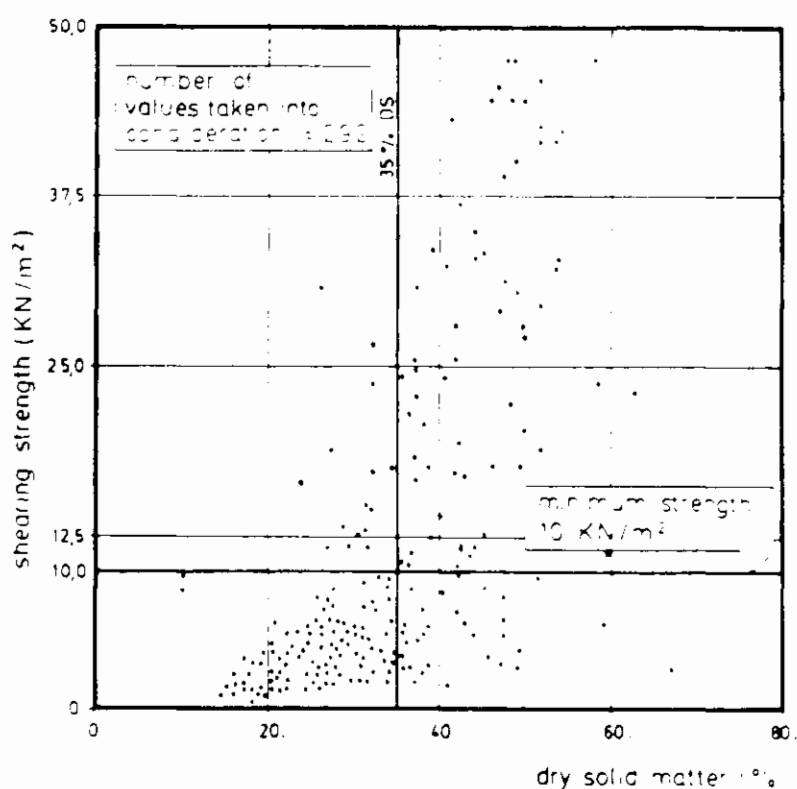
3.5.5 Relaties tussen stabiliteit en draagkracht

In de Bondsrepubliek Duitsland is onderzoek^{11,14,16} uitgevoerd naar de relaties tussen het drogestofgehalte en de ongedraineerde schuifsterkte van zuiveringsslib. Van het slib van meer dan 70 verschillende rioolwaterzuiveringsinrichtingen werden zowel het drogestofgehalte als de ongedraineerde schuifsterkte bepaald. In ongeveer 65% van het aantal waarnemingen bleek het slib bij een drogestofgehalte gelijk aan of groter dan 35% een ongedraineerde schuifsterkte van minstens 10 kN/m^2 te hebben. De resultaten van deze metingen -weergegeven in figuur 4- vormden de basis voor het formuleren van het eerder genoemde hypothetische stortbaarheids criterium (zie § 2.5). Overigens blijkt uit de figuur een aanzienlijke spreiding tussen de verschillende waarnemingen, zodat slechts over een bepaalde tendens kan worden gesproken. Daarbij is door de onderzoekers geconcludeerd dat in een aantal gevallen dergelijke slibben toch problemen opleverden bij het storten, ondanks dat werd voldaan aan een drogestofgehalte van 35% en een ongedraineerde schuifsterkte van minimaal 10 kN/m^2 .

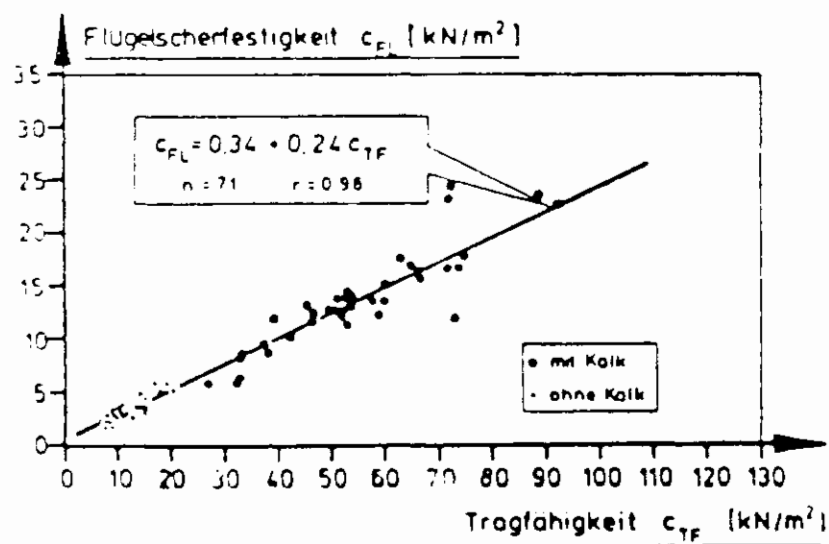
De ongedraineerde schuifsterkte werd bepaald met behulp van een laboratorium(motor)vinsonde.

Naar de mogelijke relatie tussen de ongedraineerde schuifsterkte en de draagkracht is onderzoek uitgevoerd²² op aëroob en anaëroob gestabiliseerd zuiveringsslib met drogestofgehalten van 22 tot 25% en op dezelfde slibben waaraan kalk was toegevoegd.

In dit onderzoek bleek dat de correlatie tussen de ongedraineerde schuifsterkte en de draagkracht kon worden vastgesteld met een correlatiecoëfficiënt van 0,96 (figuur 5). De correlatiecoëfficiënt wordt met name bepaald door de metingen van slibben waaraan kalk was toegevoegd. Dit onderzoek werd uitgevoerd onder geconditioneerde omstandigheden in een laboratorium.



Figuur 4. Correlatie ongedraineerde schuifsterkte en drogestofgehalte¹⁴



Figuur 5. Correlatie ongedraineerde schuifsterkte en draagkracht²³

4 SELECTIE VAN MEETMETHODEN EN -PRINCIPES

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de in het voorgaande geïnventariseerde meetmethoden geëvalueerd op hun specifieke toepassing op zuiveringsslib. In eerste instantie worden als criteria aangehouden:

- 1 relevante informatie;
- 2 nauwkeurigheid;
- 3 toepassingsgebied.

Na selectie van de best beoordeelde meetmethoden op grond van deze drie criteria vindt beoordeling plaats op:

- 4 laboratoriumgeschiktheid;
- 5 veldgeschiktheid;
- 6 gebruiksvriendelijkheid;
- 7 tijdsduur meting;
- 8 snelle informatie;
- 9 robuustheid;
- 10 kosten.

Het toekennen van beoordelingswaarden vindt plaats op basis van bevindingen in de literatuur en praktische ervaring. De uiteindelijk geselecteerde methoden worden getest bij praktijkexperimenten met slib.

4.2 Criteria eerste selectie

De criteria voor relevante informatie, nauwkeurigheid en toepassingsgebied worden als volgt omschreven:

- relevante informatie: de meetresultaten geven naar verwachting een directe aanwijzing over de directe verwerkingsmogelijkheden van zuiveringsslib op het stortterrein (I), dan wel leveren zij informatie over (de gevolgen van het) storten op langere termijn (II) met betrekking tot minstens één van de volgende criteria:
 - a de stabiliteit van een stortlichaam;
 - b de plakkerigheid c.q. adhesie van slib;
 - c de waterhuishouding van een stortlichaam.

Waardering: + concreet;
 0 indicatief;
 - niet relevant.

- Nauwkeurigheid: de nauwkeurigheid van meetresultaten wordt bepaald door systematische fouten en door toevallige fouten. De systematische fouten zijn geen willekeurige fouten maar zijn, indien ze meetbaar of berekenbaar zijn, voor de toekomst voorspelbaar. Voorbeelden daarvan zijn het verloop van instrumentafstellingen en ijkfouten. De toevallige fouten hebben een zodanig willekeurig karakter dat de wetten van de waarschijnlijkheidsrekening erop van toepassing zijn. Voorbeelden daarvan zijn afleesfouten.

De spreiding van de waarnemingsfouten door toevallige fouten heeft een bepaalde vorm in die zin dat de kans voor het optreden van een bepaalde afwijking een door de waarschijnlijkheidsberekening voorspelde functie van de grootte van die afwijking is. Deze functie noemt men de normale statistische verdeling. De selectie van meetmethoden richt zich op de vraag of de meetmethode reproduceerbare waarnemingen levert en de waarnemingen naar verwachting binnen de normale statistische verdeling vallen met een geringe standaardafwijking. Wanneer dit niet het geval is, spreekt men van een slechte reproduceerbaarheid. De nauwkeurigheid heeft dan dus betrekking op de standaarddeviatie van de normale statistische verdeling of middelbare fout in één meting. De grootte van de toevallige fout geeft aan of aan meetwaarden een absolute of een indicatieve betekenis mag worden toegekend. De beoordeling vindt plaats op basis van ervaringen in het betreffende toepassingsgebied.

Waardering: + zeer nauwkeurig;
 0 acceptabel;
 - niet acceptabel.

- Toepassingsgebied: meetmethoden kunnen zijn bedoeld voor het bepalen van een situatie in situ of voor het bepalen van eigenschappen van (monster)materiaal. In dit stadium van het onderzoek blijven de in situ-metmethoden buiten beschouwing.

Waardering: + monstername;
 - in situ.

4.3 Resultaten eerste selectie

In tabel 4 zijn alle geïnventariseerde meetmethoden ondergebracht en beoordeeld. Methoden vielen af wanneer aan de criteria de volgende waardering wordt toegekend:

Informatie I en II: 0 en -;
 nauwkeurigheid : - ;
 toepassingsgebied : - .

Op basis van de eerste selectie (tabel 4) komen de volgende meetmethoden in aanmerking voor een nadere beschouwing:

stabiliteit: triaxiaalproef
 celproef
 vrije prismaproef
 vinsondeproef met de laboratory-vane (vinapparaat)
 vinsondeproef met de handvane
 vinsondeproef met de torvane
 handsondeproef met handsondeerapparaat
 val-kegelproef met het valkegelapparaat
 laststempelproef (laststempelapparaat)
 laststempelproef (Hildesheimer Prüfstempel)
 indringingsproef (penetrometer)
 indringingsproef met de zakpenetrometer
 rotatieviscositeitmeting
 kegel-plaat viscositeitmeting
 Pfefferkornproef

Tabel 4. Beoordeling geïnventariseerde meetmethoden; eerste selectie

meetmethode	meetinstrument	meetparameter	meeteenheid	informatie (I)			informatie (II)			nauwkeurigheid	toepas- singsge- bied
				a	b	c	a	b	c		
TOEPASSINGSGBIED: BETONTECHNOLOGIE											
proef van Walz	meetlat	verdichtingsmaat	-	-	-	-	-	-	-	0	+
proef van Abrams	meetlat	zetmaat	mm	-	-	-	-	-	-	0	+
schudproef	meetlat	schudmaat	mm	-	-	-	-	-	-	0	+
TOEPASSINGSGBIED: KERAMISCHE INDUSTRIE											
pfefferkornproef	pfefferkornapparaat	schuifweerstand	N/mm ²	+	-	-	+	-	-	?	+
TOEPASSINGSGBIED: BODEM-FYSICA											
gravimetrische methode	droogstoof, balans	vochtgehalte	-	-	-	+	-	-	+	+	+
meting aan ringmonster	monsterringen	waterdoorlatendheid	m/s	-	-	-	-	-	+	+	+
gipskolonnenmethode	buret met mariotte-apparaat	waterdoorlatendheid	m/s	-	-	-	-	-	+	+	+
kubusmethode	buret met mariotte-apparaat	waterdoorlatendheid	m/s	-	-	-	-	-	+	+	+
drainkubusmethode	emmer, stopwatch	waterdoorlatendheid	m/s	-	-	-	-	-	-	+/-0	+
cylinderpermeaatiemethode		buret met mariotte-apparaat									
		waterdoorlatendheid	m/s	-	-	-	-	-	+	0	-
dubbele buizenmethode	infiltrimeter	waterdoorlatendheid	m/s	-	-	-	-	-	+	0	-
omgekeerde boorgatenmethode		meetlint met vlotter, stopwatch waterdoor- latendheid	m/s	-	-	-	-	-	+	-	-
boorgat-pompproef	meetlint met peilklok	waterdoorlatendheid	m/s	-	-	-	-	-	+	0	-
boorgatenmethode	meetlint met peilklok	waterdoorlatendheid	m/s	-	-	-	-	-	+	0	-
piëzometermethode	piëzometerbuis	waterdoorlatendheid	m/s	-	-	-	-	-	+	0	-
viërgatenmethode	manometer	waterdoorlatendheid	m/s	-	-	-	-	-	+	+	-
drainafvoermethode	meetlint met peilklok, piezo- meterbuis	waterdoorlatendheid	m/s	-	-	-	-	-	+	-	-
TOEPASSINGSGBIED: GRONDMECHANICA											
Atterbergse grenzen	toestel van Casagrande	vloeigrens	%	0	0	-	-	-	-	0	+/-
textuurbepaling	-	gewichtshoeveelheid	%	-	-	?	-	-	?	?	+
rijpingsfactorbepaling	-	rijpingsfactor	-	-	-	+	-	-	+	?	+
samendrukkingsproef	-	samendrukkingsconstante	-	-	-	-	-	-	-	?	+
schuifproef	schuiftoestel	afschuifweerstand	N/mm ²	0	-	-	0	-	-	-	+
triaxiaalproef	triaxiaalapparaat	afschuifweerstand	N/mm ²	+	-	-	+	-	-	+	+
celproef	triaxiaalapparaat	afschuifweerstand	N/mm ²	+	-	-	+	-	-	+	+

* veel monsters noodzakelijk

meetmethode	meetinstrument	meetparameter	meeteenheid	informatie (I)			informatie (II)			naauwkeurigheid toepas- singsge- bied
				a	b	c	a	b	c	
vrije-prisma-proef vinsondeproef vinsondeproef vinsondeproef handsondeerproef val-kegelproef laststempelproef laststempelproef indringingsproef indringingsproef	-	afschuifweerstand	N/mm ²	+	-	-	+	-	+	
	motorvinsonde	(vin-)afschuifweerstand	N/mm ²	+	-	-	+	0	+	
	handvinsonde	(vin-)afschuifweerstand	N/mm ²	+	-	-	+	+	+	
	torvane	(vin-)afschuifweerstand	N/mm ²	+	-	-	+	?	+	
	handsondeerapparaat	conusweerstand	N/mm ²	+	-	-	+	0	+	
	val-kegelapparaat	kegelweerstand	N/mm ²	+	-	-	+	0	+	
	laststempelapparaat	draagvermogen	N/mm ²	+	-	-	+	0	+	
	Hildesheimer Prüfstempel	draagvermogen	N/mm ²	+	-	-	+	0	+	
	handsondering	weerstandsdruk	N/mm ²	+	-	-	+	0	+/-	
indringingsproef	(zak)handsondering	weerstandsdruk	N/mm ²	+	-	-	+	?	+	
TOEPASSINGSGEBIED: LEVENSMIDDELENTHEOLOGIE EN RHEOLOGIE										
kruipmeting	rotatieviscometer	elasticiteitsmodulus	N/m ²	-	-	-	-	-	?	+
		viscositeit	NS/m ²	-	-	-	-	-	-	-
spanningrelaxatie	Instron Universal Testing Machine	zwichtspanning	N/m ²	-	+	-	-	-	+	+
		samendrukking	%	-	+	-	-	-	-	-
dynamische meting		elasticiteitsmodulus	N/m ²	-	-	-	-	-	-	+
		viscositeit	NS/m ²	-	-	-	-	-	-	?
viscositeitmeting	rotatieviscositeitmeter	zwichtspanning	N/m ²	-	-	-	-	-	-	+
		elasticiteitsmodulus	NS/m ²	-	-	-	-	-	-	-
viscositeitmeting	capillaire viscositeitmeter	zwichtspanning	N/m ²	+	-	-	+	-	0**	+
		elasticiteitsmodulus	NS/m ²	-	-	-	-	-	0**	+
viscositeitmeting	kegel-plaat viscositeitmeter	zwichtspanning	N/m ²	+	-	-	+	-	0	+
		elasticiteitsmodulus	NS/m ²	-	-	-	-	-	-	-
viscositeitmeting	kogel-viscositeitmeter	zwichtspanning	N/m ²	-	-	-	-	-	-	+
		elasticiteitsmodulus	NS/m ²	-	-	-	-	-	-	-
empirische:	kegel-handsondering	elasticiteitsmodulus	N/m ²	+	-	-	+	-	0**	+
		viscositeit	NS/m ²	-	-	-	-	-	0**	+
- penetratietest	Posthumustrechter	zwichtspanning	N/m ²	+	-	-	+	-	0	+
		elasticiteitsmodulus	NS/m ²	-	-	-	-	-	-	-
- bepaling met		elasticiteitsmodulus	N/m ²	-	-	-	-	-	-	+
		viscositeit	NS/m ²	-	-	-	-	-	-	-
** optreden van slijpverschijnsel										

plakkerigheid: Instron Universal Testing machine
waterhuishouding: gravimetrische methode
meting aan ringmonsters
gipskolommenmethode
kubusmethode
drainkubusmethode

Omdat bij de interpretatie van meetresultaten gerelateerd moet worden aan de grondmechanische classificatie van het materiaal, moeten stabiliteitsproeven vergezeld gaan van grondmechanische classificatie van het materiaal. De bepaling van de Atterbergse grenzen lijkt hiervoor het uitgangspunt.

4.4 Criteria en beoordeling van geselecteerde meetmethoden

Een korte omschrijving van de criteria ten behoeve van de nadere beoordeling is in het navolgende gegeven:

- 4 laboratoriummethode: de meetmethode is alleen uitvoerbaar in een laboratorium;
Waardering: ++ zeer geschikt;
+ geschikt;
- matig;
-- slecht.
- 5 veldmethode: de methode is uitvoerbaar op een willekeurige plaats, waaronder een laboratorium;
Waardering: ++ zeer geschikt;
+ geschikt;
- matig;
-- slecht.
- 6 gebruiksvriendelijk: het meetinstrument is eenvoudig te bedienen;
Waardering: ++ zeer goed;
+ goed;
- matig;
-- slecht.
- 7 voorbereiding: het instellen van de meetapparatuur; eventueel voorbehandeling van een monster;
Waardering: + bij < 5 minuten;
o bij 5-10 minuten;
- bij > 10 minuten.
- 8 snelle informatie: de meetresultaten zijn zonder uitgebreide omrekeningsformules vrijwel direct beschikbaar;
Waardering: + direct;
o omrekening nodig;
- tijdrovend.
- 9 robuustheid: stevigheid en geringe kwetsbaarheid van het apparaat;
Waardering: + stevig;
o matig;
- slecht.

10 kosten: aanschaffkosten + investeringen;
 Waardering: + < f 1.000,-;
 o f 1.000,- - f 5.000,-;
 - > f 5.000,-.

De resultaten van de nadere beoordeling van de geselecteerde meetmethoden zijn ondergebracht in tabel 5.

4.5 Conclusies

Geen van de geïnventariseerde meetmethoden biedt integraal informatie over de consistentie van zuiveringsslib. De methoden zijn slechts geschikt voor het afzonderlijk meten van de stabiliteit, de plakkerigheid of de waterhuishouding.

Een aantal meetmethoden biedt (in theorie) mogelijkheden voor het vaststellen van stortbaarheidparameters voor zuiveringsslib. Deze methoden zijn geselecteerd op gebruiksvriendelijkheid (6), tijdsduur meting (7), snelle informatie (8) en kosten (10). Die methoden zijn afgevalen die de volgende waardering hebben gekregen:

- gebruiksvriendelijkheid (6): -- en -;
- tijdsduur meting (7) : -;
- snelle informatie (8) : -;
- kosten (10) : -.

De volgende meetmethoden zijn onderzocht op hun toepasbaarheid voor het bepalen van de consistentie van zuiveringsslib:

- voor het beoordelen van de stabiliteit:
 - * vinsondeproef met de motorvinsonde;
 - * vinsondeproef met de handvinsonde;
 - * val-kegelproef met het val-kegelapparaat;
 - * handsondeerproef met handsondeerapparaat;
- voor het beoordelen van de draagkracht:
 - * laststempelproef met de Hildesheimerprüfstempel.
- voor het beoordelen van de waterhuishouding:
 - * gravimetrische methode;
 Volgens de selectiemethode van tabel 4 valt deze methode af; zij wordt echter bij experimenten betrokken vanwege de drogestofgehalte-bepaling.

Met de Instron Universal Testing Machine zou de adhesie van slib kunnen worden bepaald; vanwege de hoge kosten is dit apparaat buiten beschouwing gelaten. De kegelplaat-viscositeitmeter bleef eveneens buiten beschouwing, aangezien deze in alle opzichten vergelijkbaar is met de geschiktere rotatieviscositeitmeter.

criteria	4	5	6	7	8	9	10
<u>stabiliteit</u>							
Atterbergse grenzen	--	++	++	+	-	+	+
triaxiaalproef	++	--	--	-	-	+	+
celproef	++	--	--	-	-	+	+
vrije prismaproef	++	--	-	-	-	+	+
motorvinsondeproef	++/--	--/++	++	+	+	+	0
handvinsondeproef	--	++	++	+	0	+	0
vinsondeproef (torvane)	--	++	++	+	+	+	+
handsondeerapparaat	--	++	++	+	+	+	0
val-kegelproef	++	--	++	+	+	+	?
laststempelproef (laststempel- apparaat)	++	--	++	+	+	+	?
Hildesheimerprüfstempel	++	--	++	+	+	+	0
indringingsproef (penetrometer)	--	++	++	+	0	+	0
indringingsproef (zakpenetrometer)	--	++	++	+	0	+	+
rotatieviscositeitmeting	++	?	?	?	?	?	-
kegel-plaat viscositeitmeting	++	?	?	?	?	?	?
Pfefferkornproef	++	--	++	+	0	+	?
<u>plakkerigheid/adhesie</u>							
Instron Universal Testing Machine	++	--	+	-	0	+	-
<u>waterhuishouding</u>							
gravimetrische methode	++	--	++	-	0	+	+
meting aan ringmonsters	++	--	+	-	0	+	+
gipskolommenmethode	--	++	+	-	0	+	+
kubusmethode	--	++	++	-	0	+	+
drainkubusmethode	--	++	++	-	0	+	+
4= laboratoriummethode 5= veldmethode (en lab. methode) 6= gebruiksvriendelijk 7= tijdsduur meting 8= snelle informatie 9= robuustheid 10= kosten							

Tabel 5. Nadere beoordeling van geselecteerde meetmethoden
(? : Geen beoordeling mogelijk)

5 EXPERIMENTEN

5.1 Uitgangsmaterialen

Om een indruk te krijgen van de toepasbaarheid van de geselecteerde meetmethoden op zuiveringsslib zijn experimenten uitgevoerd met natuurlijk ontwaterd zuiveringsslib, zuiveringsslib ontwaterd door middel van een zeebandpers, centrifuge en kamerfilterpers en natuurlijk ontwaterd drinkwaterslib. De eigenschappen van deze slibben zijn weergegeven in tabel 6. De keuze van deze slibben is bepaald door de kwantiteit van de voorkomende slibsoorten in Nederland en literatuurinformatie.

5.2 Toegepaste meetmethoden

De apparatuur voor het meten van de grondmechanische stabiliteit is gebaseerd op de grondmechanische klassificatie van het (monster) materiaal. Van de betreffende slibben zijn de dichtheid, het drogestofgehalte, het organisch-stofgehalte, het gehalte aan delen $2\ \mu\text{m}$ en in enkele gevallen de consistentiegrenzen volgens de methode van Atterberg, bepaald als classificatiegrootheden.

Voor het bepalen van de (grondmechanische) stabiliteit van de slibben zijn onderstaande grondmechanische (g) en rheologische (r) meetmethoden toegepast:

- handsondeeropproeven	(g)
- val-kegelproef	(g)
- handvinsonde	(g)
- motorvinsonde	(g)
- laststempel	(g)
- rotatie-viscositeitmeting	(r)

In tabel 7 zijn enkele kenmerken van de gebruikte meetmethoden samengevat.

5.3 Resultaten

De resultaten worden als volgt weergegeven:

- resultaten van de classificatie-experimenten;
- resultaten van de afschuifmetingen;
- resultaten van de draagkrachtmetingen.

5.3.1 Classificatie-experimenten

In deze experimenten werd de mogelijkheid bekeken om zuiveringsslib te classificeren op dezelfde routinematige wijze als grond. De classificatie-experimenten werden uitgevoerd met het toestel van Casagrande voor de bepaling van de consistentiegrenzen en het Pfeffer-kornresthoogte-apparaat voor de instuikhoogte.

De Atterbergse- of consistentiegrenzen konden niet of nauwelijks worden bepaald. De reproduceerbaarheid van de proeven was zeer slecht en de resultaten van deze metingen laten zich niet vergelijken met waarden die op dezelfde wijze worden bepaald voor een grondsoort zoals bijvoorbeeld klei.

code	herkomst	soort	volumieke massa ton/m ³	droge stof % van droge- stofge- halte	gloeiver- vals % gew. % v.d. mi- neralen zonder CaO	toeslag (kg/ton droge stof)			geur	structuur	ver- smear baar	overig	opmerking
						CaO	FeCl ₃	poly- meren					
a	rwzi Rhenen	zeefbandpers- slib	0,99	15	75	25,1	-	4	donker- grijs	homogeen	ja	-	-
b1	rwzi Dokhaven	centrifuge- slib	0,98	22	61	19,1	-	6-7	zwart luchtig	homogeen	ja	plakkerig	-
b2	rwzi Dokhaven	gedroogd cen- trifugeslib	1,02	25	56	30,0	-	6-7	grijs- zwart	korrelig	licht	bevat ste- nen ϕ 3,5 cm	gedroogd op Hartelmond
c1	rwzi Harderwijk	zeefbandpers- slib	0,99	24	35	21,3	500	5,5	geel- bruin	korrelig	redelijk	-	-
c2	rwzi Zutphen	zeefbandpers- slib	0,57	56	54	3,5	-	1,67 g/m ³	zwart	fijn- korrelig	niet	droog	gecomposteerd en vermengd met zaag- sel
c3	rwzi Kralingse veer	zeefbandpers- slib	1,00	18	68	18,3	-	-	zwart	homogeen	ja	plakkerig	-
d1	rwzi Eindhoven	filterpers- slib	1,04	29	36	15,4	400 600	-	bruin- grijs	luchtig grote brokken	ja	-	-
d2	rwzi Helmond	filterpers- slib	0,89	40	30	14,1	500	-	groen- grijs	grote brokken, kleine korrels	ja	harde brokken	-
e	rwzi Amsterdam Oost	kamerfilter- persslib	0,85	29	63	19,1	-	4-6	zwart	weinig	ja	-	-
f	rwzi Geestmer- ambacht	natuurlijk ontwaterd slib	1,10	36	38	5,1	-	-	grijs- bruin brokken	geen	ja	bevat plan- tewortels	-
g1	enwa Roosen- daal/Nispen	drinkwater- slib	1,15	32	16	23,3	-	-	rood	geen	ja	-	-
g2	gwa Weesper- karspel	drinkwater- slib	1,10	29	25	23,8	-	-	donker- rood- bruin	geen	ja	bevat ijzer- oxydekorrels	-

* gemeten in de monsterbeker (gemiddeld)

Tabel 6. Eigenschappen van de geselecteerde slibben

Meetmethode	aanpassing meetbereik door:	aflezing	meetbereik	afleesnauwkeurigheid	aantal metingen monster	meetparameter
motorvinsonde (motorsonde)	variatie in torsionen en afmeting vinsonde	0-360°	0-200 kN/m ²	1°	3	ongedr. schuifsterkte Su kN/m ²
handvinsondeproef (handsonde)	5 vanen	0-13 schaaldelen	0-200 kN/m ²	0,1	3	ongedr. schuifsterkte Su kN/m ²
handsondeerapparaat	conussen	0-1 kN	0-1000 kN/m ²	0,02 kN	3	ongedr. schuifsterkte kN/m ²
val-kegelproef	afmeting kegels	0-20 mm	0-245 kN/m ²	0,5 mm	5	ongedr. schuifsterkte Su kN/m ²
laststempelproef (Hild. Prüfstempel)	gewichten	0-150 mm	0-150 mm	0,5 mm	5	draagvermogen N/cm ²
rotatieviscositeit- meting	diverse mon- sterbekers en draai- lichamen	0-100 schaaldelen	0,1-5000 N.s/m ²	1 schaaldeel	3	viscositeit

Tabel 7. Enkele kenmerken van de meetmethoden

Het is niet aannemelijk dat zuiveringsslib in het algemeen op een dergelijke wijze kan worden geclassificeerd. De oorzaak is vermoedelijk de samenstelling van de droge stof waarin -door een groot gehalte aan organische stof- zuiveringsslib wezenlijk verschilt van een natuurlijk bodemmateriaal.

Omdat classificatie niet mogelijk is, ontbreekt een referentiekader voor het interpreteren van de afschuifsterktes gemeten met het handsondeerapparaat, de val-kegel en de vinsondes. De aldus gemeten waarden voor de afschuifsterkte in zuiveringsslib kunnen niet worden vergeleken met dergelijke waarden voor klei of zand.

5.3.2 Meetmethoden grondmechanische stabiliteit

De meetmethoden zijn bekeken op reproduceerbaarheid. Per meetmethode zijn de gemeten afschuifsterktes (S_u) als functie van het drogestofgehalte weergegeven. De metingen werden uitgevoerd op monsters die zonder verdere verdichting in een monsterbeker werden gebracht. De gemiddelde waarden, gemeten met de motorsonde, de handsonde en de val-kegel als functie van het drogestofgehalte, zijn onderling vergeleken.

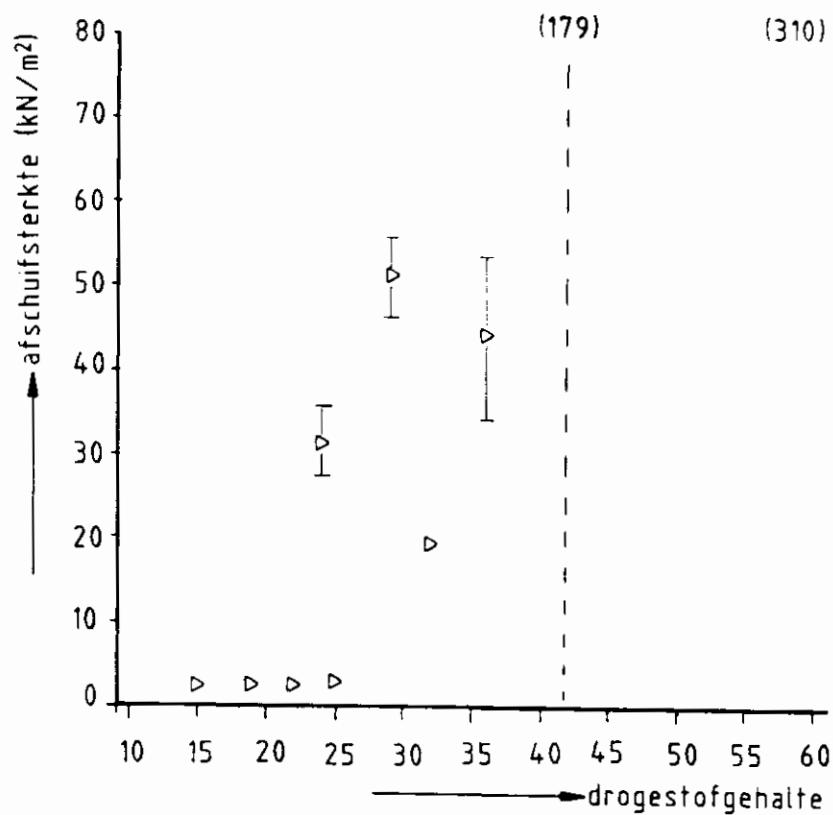
Een van de onderzochte monsters bestond uit gecomposteerd zuiveringsslib met een drogestofgehalte van 56%. Na compostering van het zuiveringsslib wordt het daarvoor benodigde toeslagmateriaal (houtsnipper) grotendeels door zeven verwijderd; een beperkt deel blijft echter achter. Dit gecomposteerde zuiveringsslib is niet of nauwelijks met een natuurlijke grondsoort of met zuiveringsslib vergelijkbaar. Omdat gecomposteerd zuiveringsslib in het algemeen zonder verdere beperking wordt geaccepteerd door stortbeheerders -goed stortbaar en geen problemen met berijdbaarheid- is dit materiaal wel in de experimenten betrokken. De metingen aan dit materiaal kunnen worden gezien als referentie voor een goed stortbaar produkt.

Handsondeerapparaat (figuur 6)

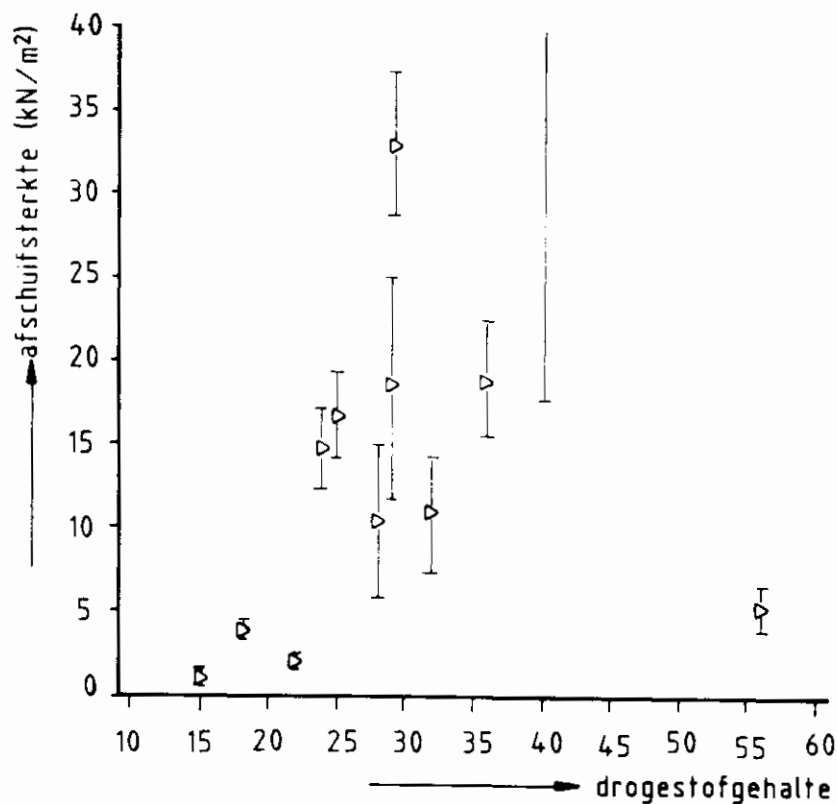
Bij drogestofgehaltenes <25% treedt nauwelijks variatie in de gemeten waarde op. Bij drogestofgehaltenes >25% worden relatief hoge waarden gemeten voor de afschuifsterkte: 179 en 310 kN/m² bij respectievelijk 40 en 56% d.s.

Val-kegel (figuur 7)

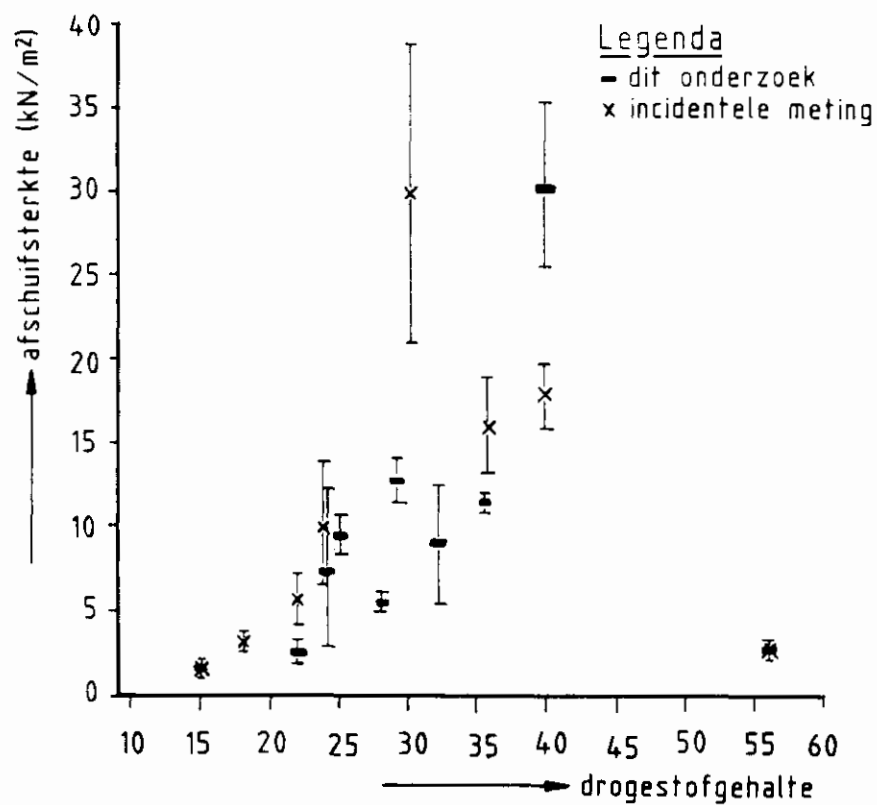
De afschuifsterktes zijn met één uitzondering alle lager dan 40 kN/m². Bij een drogestofgehalte van 40% werd een gemiddelde afschuifsterkte van 67,4 kN/m² gemeten met een standaardafwijking groter dan 20. De spreiding van de waarnemingen is relatief groot. De reproduceerbaarheid wordt daarom niet groot geacht.



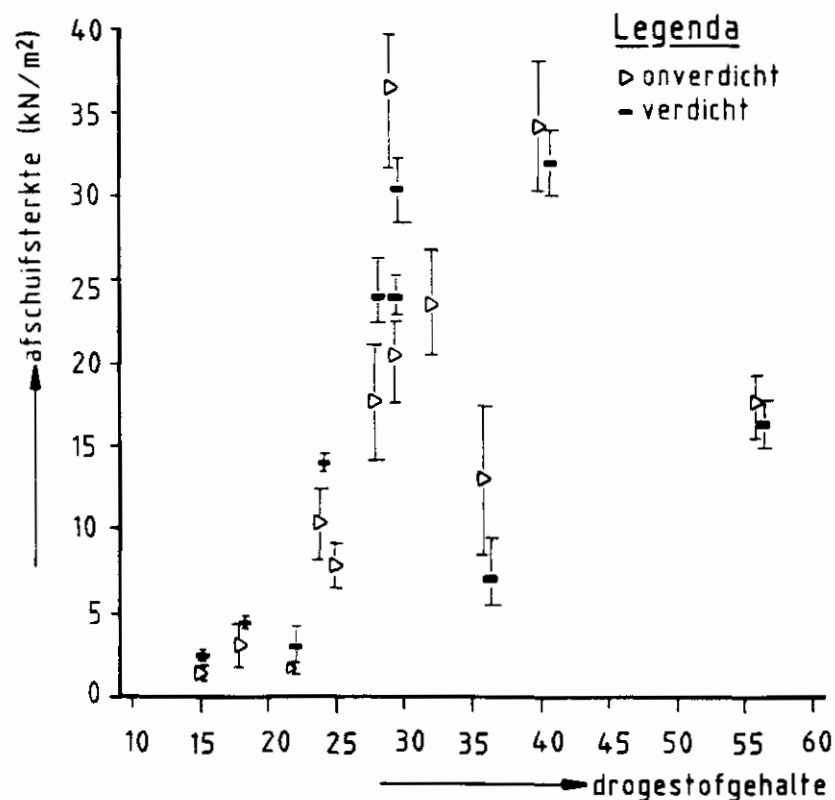
Figuur 6. Su als functie van het drogestofgehalte (handsondeerapparaat)



Figuur 7. Su als functie van het drogestofgehalte (val-kegel)



Figuur 8. S_u als functie van het drogestofgehalte (handvinsonde)



Figuur 9. S_u als functie van het drogestofgehalte (motorvinsonde)

Handvinsonde_(figuur_8)

Zowel de monster(voor)bereiding als de metingen zijn uitgevoerd door één persoon. Ten opzichte van de metingen met het handsondeerapparaat en de val-kegel hebben de afschuifsterktes met de handvinsonde een lagere waarde. De metingen bleken redelijk reproduceerbaar. Incidenteel zijn door een ander, in hetzelfde monster identieke metingen uitgevoerd. Deze waarnemingen -aangegeven in de figuur- gaven aanzienlijke verschillen met de eerdere waarnemingen.

Motorvinsonde (figuur 9)

Bij deze methode is eveneens gekeken naar het effect van het verdichten van het monstermateriaal. De spreiding van de meetresultaten in de niet verdichte monsters was groter dan in de verdichte monsters. De monstervoorbereiding door verschillende personen leidde niet tot significante verschillen in de gemeten waarden voor de afschuifsterktes. De resultaten geven aan dat in de niet-verdichte monsters een grotere afschuifsterkte wordt gemeten dan in de verdichte monsters. Voor zover op het beperkte aantal waarnemingen regressie-analyse mag worden toegepast, duidt de correlatiecoëfficiënt van de waarnemingen in de verdichte monsters op een kleinere spreiding dan in de niet-verdichte monsters. De verschillen zijn relatief klein in monsters met een drogestofgehalte <25%.

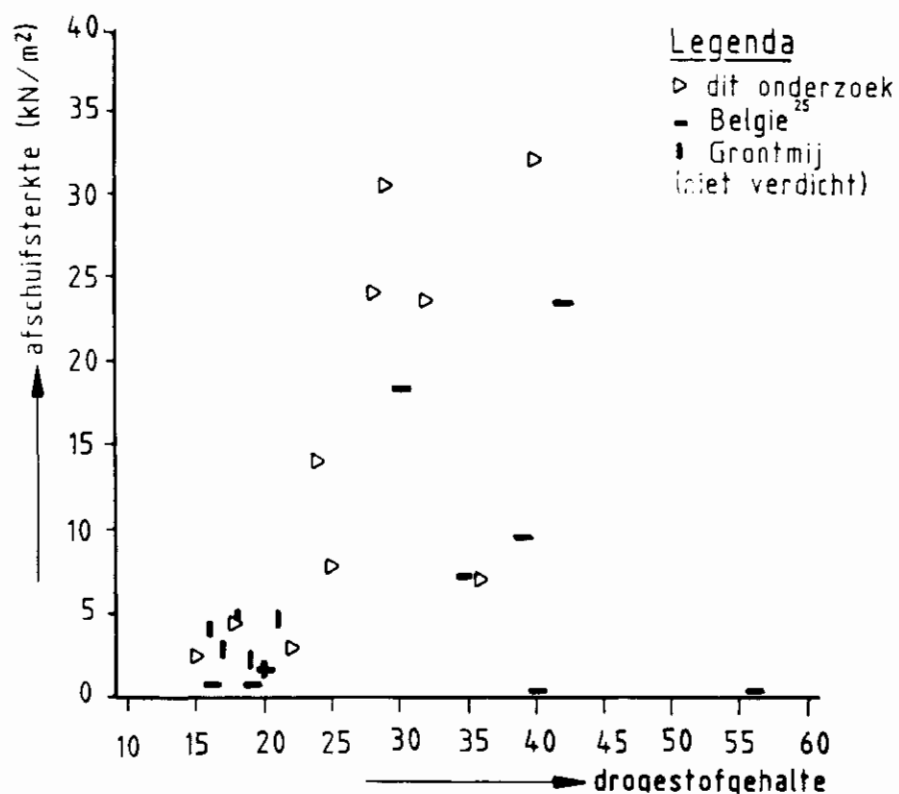
De metingen uitgevoerd in het kader van dit onderzoek zijn vergeleken met metingen die op gelijke wijze zijn uitgevoerd in België en op eerder gestorte slibben op een Nederlandse stortplaats. De resultaten zijn weergegeven in figuur 10. Geconcludeerd kan worden dat bij lage drogestofgehaltes de verschillen tussen de gemeten afschuifsterktes minimaal zijn. Voor de verschillen bij hogere drogestofgehaltes kunnen meerdere redenen worden aangevoerd (monstername, monstervoorbereiding). Met het drogestofgehalte alleen zijn ze niet verklaarbaar.

Vergelijking meetresultaten motorvinsonde, handvinsonde en val-kegel

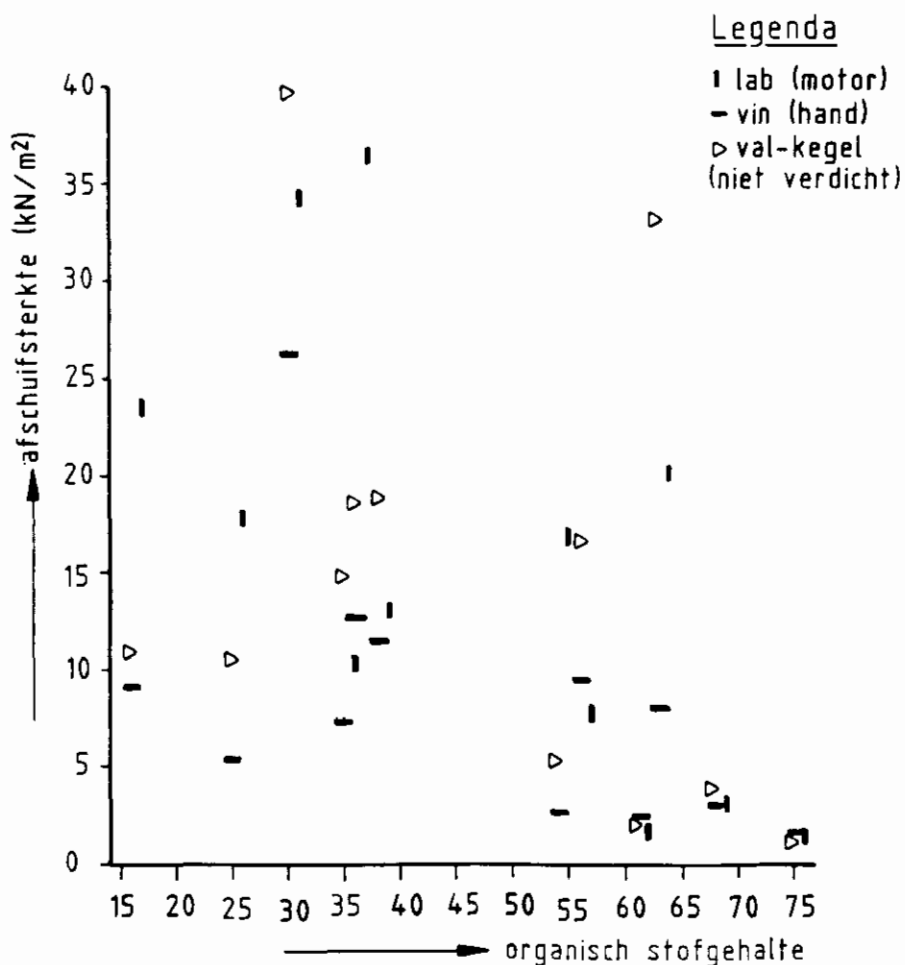
De gemiddelde meetwaarden bepaald met de motorvinsonde, de handvinsonde en de val-kegel als functie van het organisch-stofgehalte van het slib -in niet verdicht monstermateriaal- zijn weergegeven in figuur 11. Er blijkt geen verband tussen het organisch-stofgehalte en de afschuifsterkte.

Bij toepassing van het handsondeerapparaat blijkt dat bij toenemend drogestofgehalte niet of nauwelijks een andere waarde voor de afschuifsterkte kan worden gemeten, althans tot een drogestofgehalte van 25%. Deze methode lijkt derhalve niet te kunnen worden toegepast voor de bepaling van de afschuifsterkte van zulveringsslib.

Uit figuur 10 blijkt dat de afschuifsterkte toeneemt bij toenemend drogestofgehalte. Beneden een drogestofgehalte van 20% zijn de verschillen in meetwaarden per monster marginaal; boven een drogestofgehalte van 20% neemt de spreiding in de waarnemingen per monster toe. De spreiding per monster is in de verdichte monsters kleiner dan in de niet-verdichte monsters.



Figuur 10. Gemiddelde S_u als functie van het drogestofgehalte (motorvinsonde)



Figuur 11. Gemiddelde S_u als functie van het organisch stofgehalte (motorvinsonde handvinsonde en val-kegel)

Bij een drogestofgehalte groter dan 25% is de gemiddelde afschuifsterkte altijd groter dan 10 kN/m^2 en neemt verder toe bij een toenemend drogestofgehalte. De betekenis van de absolute waarde van de gemeten afschuifsterkte voor de stortbaarheid is uit deze metingen niet af te leiden. Het gecomposteerde zuiveringsslib - met een stortbaarheid die in de praktijk als goed wordt ervaren - heeft relatief gezien een lage afschuifsterkte. In zijn algemeenheid bestaat er dus een relatie, doch er zijn uitzonderingen bij niet-cohesieve materialen. Een lage afschuifsterkte hoeft dus niet noodzakelijkerwijs te betekenen dat het desbetreffende materiaal geen goede stortbaarheidseigenschappen zou hebben; anderzijds houdt een grote afschuifsterkte niet altijd in dat het slib goed stortbaar is.

De metingen met de motorvinsonde en de val-kegel zijn uitgevoerd door diverse personen. De verschillen in waarneming bleken daarbij verwaarloosbaar. Dit was niet het geval bij de metingen met de handvinsonde; het uitvoeren van metingen in hetzelfde monster leverde in alle gevallen verschillen waarvan de grootste 17 kN/m^2 meer bedroeg dan de eerder gemeten 12 kN/m^2 . Ook een lagere waarde werd gemeten (18 kN/m^2 ten opzichte van de eerder gemeten 30 kN/m^2).

5.3.3 Meetmethode draagkracht

De draagkrachtmetingen met het Hildesheimer Prüfstempel zijn weergegeven in figuur 12 als functie van het drogestofgehalte en in figuur 13 als functie van de afschuifsterkte. De indringdiepte is vastgesteld bij een belasting van 50 kN/m^2 . In deze figuur zijn tevens meetwaarden opgenomen van slibben op een stortplaats. Te zien is dat de indringing bij een drogestofgehalte kleiner dan 30%, een diepte van 10 mm zal overschrijden.

Figuur 13 geeft de indringdiepte als functie van de afschuifsterkte en tevens de correlatie uit Duits onderzoek²³, (zie par. 3.5.5). Gezien het relatief beperkte aantal metingen kon deze correlatie noch worden bevestigd noch worden ontkend.

5.3.4 Viscositeitmeting

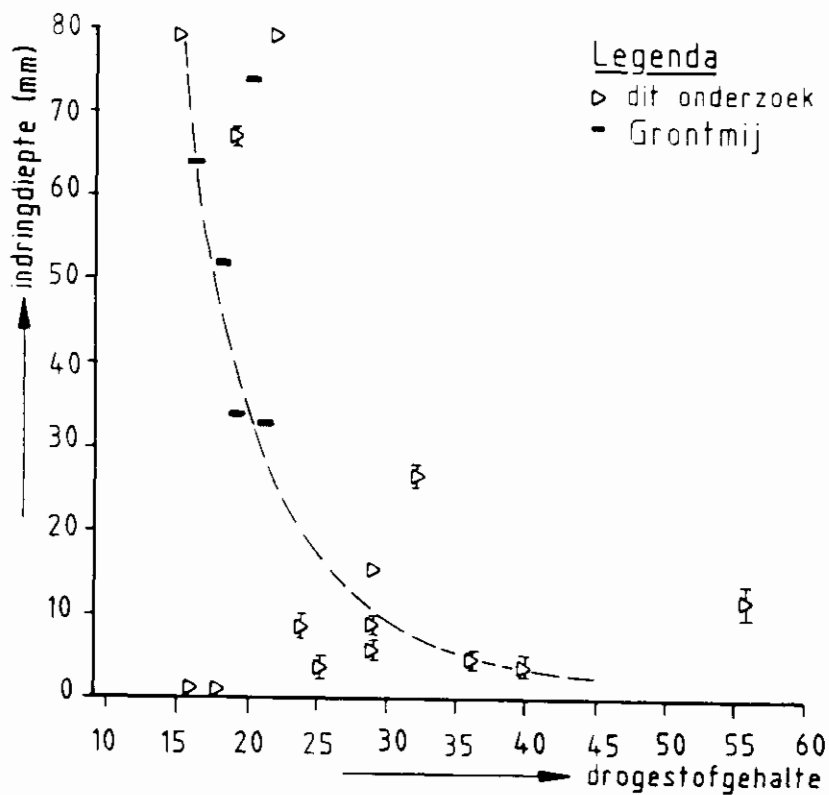
Viscositeitmetingen zijn uitgevoerd met twee verschillende viscositeitsmeters. Door de constructie van de gebruikte apparatuur is het alleen mogelijk om de viscositeit te meten van slib met een dusdanig laag drogestofgehalte dat gesproken moet worden van vloeibaar slib. Van "steekvaste" slibben kan de viscositeit -als mogelijke parameter voor de consistentie- niet op eenvoudige wijze worden bepaald.

5.4 Conclusies en aanbevelingen

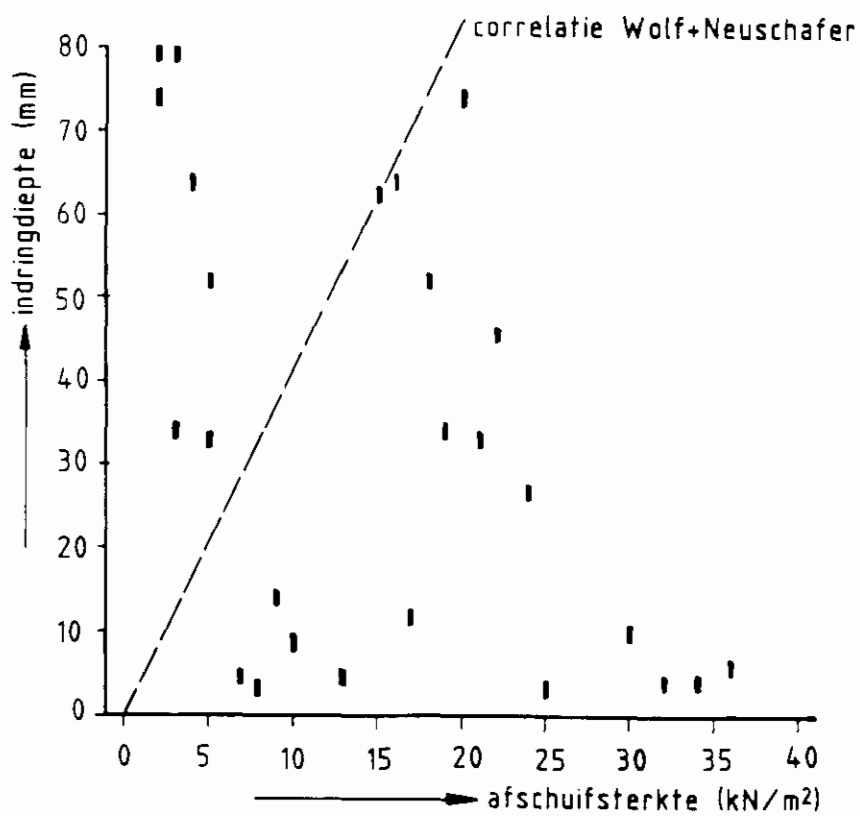
Uit de experimenten kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- zuiveringsslib kan niet worden geclassificeerd volgens de gangbare methode waarmee grond wordt geclassificeerd. Dit betekent dat geen referentiekader aanwezig is -en dus geen vergelijking mogelijk is- van metingen van de afschuifsterkte van bodemmateriaal en zuiveringsslib;
- van de onderzochte meetmethoden valt de viscositeitsmeter af. De viscositeit van steekvaste slibben kan niet op eenvoudige wijze worden gemeten;

- verschillende meetapparaten geven verschillende resultaten voor dezelfde slibben;
- het handsondeerapparaat wordt op grond van de meetresultaten niet geschikt geacht om de afschuifsterkte van zuiveringsslib te bepalen;
- de metingen met de val-kegel blijken slecht reproduceerbaar ten opzichte van die met de handvinsonde en de motorvinsonde. Op basis hiervan wordt de val-kegel niet geschikt geacht voor het bepalen van de afschuifsterkte van slib;
- met de handvinsonde kunnen redelijk betrouwbare metingen worden uitgevoerd, mits dit door een en dezelfde persoon gebeurt. Dit zou in de praktische situatie tot grote verschillen in waarneming kunnen leiden. Om deze reden wordt de toepassing van de handvinsonde voor het bepalen van de afschuifsterkte in zuiveringsslib afgeraden;
- de motorvinsonde blijkt redelijk tot goed reproduceerbare waarden te geven. Van belang daarbij is dat de monstervoorbereiding met zorg plaatsvindt. Onverdichte monsters kunnen in vergelijking met verdichte monsters zowel hogere als lagere afschuifsterkten geven;
- in niet-cohesieve materialen zoals gecomposteerd zuiveringsslib worden lagere afschuifsterktes gemeten dan in cohesieve materialen. Een lage afschuifsterkte behoeft dus niet per definitie te betekenen dat slib niet goed stortbaar zou zijn; een hoge waarde behoeft niet te betekenen dat slib wel goed stortbaar is;
- er blijkt geen verband tussen het organische-stofgehalte van slib en de afschuifsterkte;
- de betekenis van de in het onderzoek gemeten waarden voor de stabiliteit en de draagkracht is relatief. Voor het vaststellen van goed onderbouwde grenswaarden zullen meer metingen van stortbare slibben nodig zijn.



Figuur 12. Draagkracht als functie van het drogestofgehalte
(Hildesheimer Prüfstempel)



Figuur 13. Draagkracht als functie van de afschuifsterkte²³

6.1 Algemeen

In hoofdstuk 2 zijn de grondmechanische stabiliteit en de draagkracht betrokken in de definiëring van de consistentie van te storten zuiveringsslib. De grondmechanische stabiliteit kan worden gekarakteriseerd door de afschuifsterkte, de draagkracht door de indringingsdiepte van een laststempel.

De consistentie van het zuiveringsslib zou kunnen worden gedifferentieerd naar de stortmethode, aangezien de stortbaarheidseigenschappen van slibben niet onder alle omstandigheden dezelfde behoeven te zijn. Een groot aandeel slib als een ononderbroken laag aanwezig, kan aanleiding zijn tot een verminderde grondmechanische stabiliteit van het stortlichaam. Eenzelfde hoeveelheid slib, maar nu homogeen vermengd met andere afvalstoffen behoeft nauwelijks te leiden tot een vermindering van de grondmechanische stabiliteit. In het eerste geval zou het slib dus een grotere afschuifsterkte moeten hebben dan in het tweede geval. Ditzelfde geldt voor de draagkracht. Opgemerkt wordt dat nog andere factoren -zoals de water- en de gashuishouding- de grondmechanische stabiliteit van stortlichamen beïnvloeden.

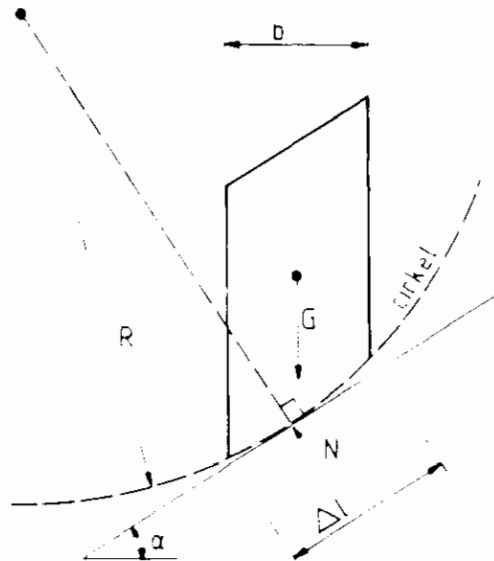
Berekeningen die voor taluds van dijken en andere grondlichamen inzicht moeten geven in de stabiliteit van die grondlichamen komen globaal op het volgende neer^{2,7,18,19}.

Door het talud wordt een cirkelvormige snede aangebracht. Het grondlichaam binnen deze snede wordt verdeeld in smalle verticale stroken, lamellen genoemd en per lamel wordt een aantal evenwichtsvergelijkingen opgesteld. In dit soort berekeningen spelen meervoudig statistisch onbepaalde berekeningen een rol. Bij n lamellen kunnen $3n$ evenwichtsvergelijkingen worden opgesteld, terwijl daartegenover $(5n - 2)$ onbekenden staan. De vormveranderingen van het materiaal waaruit het grondlichaam is opgebouwd, blijven daarbij buiten beschouwing. De stabiliteitsvergelijkingen kunnen dus slechts worden uitgevoerd door voor een aantal parameters aannames te doen. De methodes die zijn ontwikkeld voor het berekenen van de grondmechanische stabiliteit, onderscheiden zich hoofdzakelijk door het verschil in aannames.

In al deze berekeningen wordt een zogenaamde veiligheidsfactor als criterium voor de stabiliteit gebruikt, ook wel stabiliteitsfactor genoemd, en gedefinieerd als het quotiënt van het weerstandgevend koppel en het aandrijvend koppel. Het weerstandgevend koppel is het totale moment, om het middelpunt van de glijcirkel, van de wrijving en de cohesie welke in het glijvlak tot ontwikkeling komen. Het aandrijvend koppel is het moment, om het middelpunt van de glijcirkel, van het totale gewicht van de grond binnen de glijcirkel.

Een belangrijke aanname in deze berekeningsmethodiek is het cirkelvormig glijvlak. Bij een min of meer homogene profielopbouw blijkt deze cirkelvorm een redelijke benadering te zijn van het werkelijk optredende glijvlak. Indien de wrijvingseigenschappen van de diverse materialen waaruit het lichaam is opgebouwd sterk uiteenlopen, is deze aanname onjuist en kan leiden tot een onjuiste schatting van de stabiliteit.

In figuur 14 is de schematisatie van een lamel weergegeven en een opsomming van de parameters die bij de berekening zijn betrokken. Voor grondlichamen worden in het algemeen stabiliteitsfactoren gehanteerd die liggen in het gebied van 1,3 tot 1,5.



Factoren betrokken bij stabiliteitsberekeningen:

- c = cohesie van grond ter plaatse van glijvlak van betreffende lamel
- ϕ = wrijvingshoek van grond ter plaatse van glijvlak van betreffende lamel
- Δl = lengte van glijvlak van lamel
- N = effectieve normaalkracht loodrecht op het glijvlak
- G = totale gewicht (eventueel inclusief water) van lamel
- α = hoek van glijvlak met horizontaal
- u = waterspanning ter plaatse van het glijvlak
- n = aantal (vertikale) lamellen
- R = straal van de glijcirkel

Figuur 14. Schematisatie bodemelement

6.2 Stabiliteitsfactor

Naar de stabiliteit van stortlichamen waarin -naast huishoudelijke afvalstoffen en daarmee te verwerken bedrijfsafval- slib is gestort, is ondermeer door Gay^{7,14} onderzoek uitgevoerd. Gay stelt dat het aandrijvend koppel -onder invloed van de geometrie van het stortlichaam en uitwendige krachten- altijd is gerelateerd aan de massa van het gestorte materiaal; het weerstandgevend koppel is gerelateerd aan de afschuifweerstand. De afschuifweerstand volgens de wet van Coulomb:

$$\tau_f = c' + \sigma' \operatorname{tg} \phi'$$

waarin:

- τ_f = schuifspanning bij bezwijken of schuifsterkte (kN/m^2);
- c' = cohesie (kN/m^2);
- σ' = effectieve normaalspanning op het schuifvlak (kN/m^2);
- ϕ' = hoek van inwendige wrijving (graden).

moet daarbij worden onderscheiden in een (water)spanningsafhankelijke afschuifweerstand en een spanningsonafhankelijke afschuifweerstand.

Voor huishoudelijke afvalstoffen werd door Gay een cohesie van 7 kN/m^2 bij een hoek van inwendige wrijving van 38° bepaald uit metingen. De gestorte huishoudelijke afvalstoffen worden min of meer waterdoorlatend verondersteld waardoor sprake is van spanningsafhankelijke afschuifweerstand.

Gestort zuiveringsslib is veelal waterverzadigd en, ten opzichte van huishoudelijke afvalstoffen, niet-waterdoorlatend.

Bij consolidatie van slib in het stortlichaam neemt de weerstand tegen afschuiving toe; de afschuifweerstand wordt dan spanningsafhankelijk verondersteld. Door Gay⁷ wordt in dit geval aangenomen dat de hoek van inwendige wrijving 14° bedraagt. Wanneer geen consolidatie optreedt, wordt de afschuifweerstand als spanningsonafhankelijk aangenomen. De hoek van de inwendige wrijving wordt in dit geval gesteld op 0° . Een gestorte hoeveelheid slib zal, na consolidatie, onder een helling $>14^\circ$ afschuiven. Zonder consolidatie zal het slib onder elke helling afschuiven.

Voor grondlichamen worden stabiliteitsfactoren gehanteerd die liggen tussen 1,3 en 1,5. Het betreft dan materiaal dat min of meer in een biologisch stabiele toestand verkeert. Huishoudelijke afvalstoffen en slib bestaan voor een belangrijk deel uit organische stof. Onder invloed van biologische processen zal afbraak van de organische stof optreden. Hierdoor zullen niet alleen de afschuifsterktes van de materialen veranderen, maar ook zal lange-termijnconsolidatie optreden. De grondmechanische stabiliteit van het stortlichaam zal als gevolg van deze processen aan veranderingen onderhevig zijn. Door Gay wordt daarom een stabiliteitsfactor van 2,25 à 2,5 aanbevolen voor stortlichamen opgebouwd uit huishoudelijke afvalstoffen met daarin zuiveringsslib vermengd tot een homogene massa.

6.3 Stabiliteit in relatie tot de stortmethode

Door Gay⁷ zijn de diverse methoden voor het storten van zuiveringsslib geïnventariseerd (zie bijlage 1). Daarnaast heeft hij stabiliteitsberekeningen uitgevoerd aan de invloed van zuiveringsslib op de grondmechanische stabiliteit van het stortlichaam.

Uitgaande van een stabiliteitsfactor van 2,5 voor een stortlichaam alleen bestaande uit huishoudelijke afvalstoffen, bleek deze factor af te nemen tot 1,7 wanneer 10 volumeprocent zuiveringsslib als lagen met een dikte van 0,5 m tussen de huishoudelijke afvalstoffen werd aangebracht. Het zuiveringsslib had daarbij een cohesie van 10 kN/m^2 bij een drogestofgehalte van 38% (zie ook figuur 2). Uit proeven bleek dat afschuiving het eerst optrad in de onderste sliblaag. Mede op basis van deze bevindingen zijn experimenten uitgevoerd waarbij het slib in pakketten (cassetten) in het stortlichaam werd aangebracht. De belangrijkste conclusies uit dit onderzoek zijn:

- kleine onderbrekingen in sliblagen kunnen al bijdragen tot een toename van de stabiliteit(sfactor);
- hoe smaller de basis van het ingebouwde pakket slib, hoe groter de stabiliteit;
- de stabiliteitsfactor van een stortlichaam met daarin 20 volumeprocent zuiveringsslib (met een cohesie van 10 kN/m^2) is:
 - * 0,54 bij een laagsgewijze inbouw;

- * 2,02 bij inbouw in pakketten die een maximale helling van 45° ten opzichte van de taludhelling hebben;
- de stabiliteit is evenredig met de logaritme van de hellingshoek van het talud.

6.4 Samenvatting en conclusies

De grondmechanische stabiliteit van een stortlichaam kan worden benaderd door middel van stabiliteitsberekeningen. Daarin worden aannamen gedaan over de invloed van de gestorte materialen op de in een stortlichaam heersende krachten. Deze berekeningen hebben als uitgangspunt het quotiënt tussen het weerstandgevend koppel en het aandrijvend koppel, de stabiliteitsfactor.

Voor stortlichamen opgebouwd uit huishoudelijke afvalstoffen wordt op basis van Gay's bevindingen een stabiliteitsfactor 2,25 à 2,5 aanbevolen. Door het storten van zuiveringsslib neemt deze stabiliteitsfactor af. De mate waarin is -naast de consistentie van het slib- afhankelijk van de gevolgde stortmethode. Bij een laagsgewijze inbreng van het slib in het stortlichaam is deze afname het grootst; bij de inbouw van het slib in pakketten is de invloed minder. De stabiliteit van het stortlichaam is niet constant en neemt af in de tijd als gevolg van de biologische afbraakprocessen. Daarbij kan enerzijds consolidatie optreden die de stabiliteit positief beïnvloedt, anderzijds kan de waterdoorlatendheid afnemen en daarmee de stabiliteit van het stortlichaam.

Grenswaarden voor afschuifsterkte en draagkracht worden bepaald door hun invloed op de grondmechanische stabiliteit en/of de draagkracht van het stortlichaam. Daarbij zijn stortmethode en de lange-termijneffecten van belang.

Naar beide factoren wordt momenteel nog onderzoek uitgevoerd door onder meer de Commissie voor de Europese Gemeenschap in het kader van het COST 681-programma "Treatment and use of organic sludges and liquid agricultural wastes". Voorlopige resultaten hiervan zijn in het onderhavige onderzoek betrokken. Voornamelijk in de Bondsrepubliek en in Zwitserland wordt getracht grenswaarden voor de stortbaarheid van zuiveringsslib afhankelijk van de toe te passen stortmethode te formuleren.

In het COST 681-onderzoek is gebleken dat het in de Bondsrepubliek Duitsland oorspronkelijk gehanteerde hypothetische stortbaarheidscriterium voor zuiveringsslib - een ongedraineerde schuifsterkte van minimaal 10 kN/m^2 bij een drogestofgehalte van minimaal 35% - is verlaten. Door Otte-Witte¹⁶ is onderzoek uitgevoerd naar deze parameters. Uit dit onderzoek, waarin meer dan 1000 monsters werden onderzocht, bleek dat in 65% van de waarnemingen aan de minimale afschuifweerstand en het drogestofgehalte werd voldaan, maar dat een groot deel van deze slibben toch niet goed verwerkbaar was als stortmateriaal.

Gay⁷ constateerde dat -uitgaande van de hypothetische grenswaarde- de stabiliteitsfactor van een stortlichaam al direct (te) sterk afneemt. De stabiliteitsfactor zal nog verder afnemen door de biologische afbraakprocessen. Het positieve effect op de stabiliteit door de consolidatie is daarbij verwaarloosbaar. De stabiliteitsfactor van het stortlichaam zal dus door het aanbrengen van zuiveringsslib direct afnemen en op de lange termijn verder afnemen als gevolg van afbraakprocessen. Bij het gemengd storten van huishoudelijke afvalstoffen en zuiveringsslib is het, in verband met de handhaving van de stabiliteitsfactor op de langere termijn, noodzakelijk dat de aanvangswaarde van de afschuifweerstand van het te storten slib groter is dan 10 kN/m^2 .

Op basis van de nu beschikbare resultaten wordt in COST-verband aanbevolen een afschuifsterkte van $15\text{-}20 \text{ kN/m}^2$ aan te houden voor te storten zuiveringsslib. Ervan uitgaande dat op langere termijn de stabiliteit van het stortlichaam kan afnemen als gevolg van de afbraak van organische stof, wordt overwogen om van een afschuifsterkte van $25\text{-}30 \text{ kN/m}^2$ uit te gaan op het moment van storten. Voor het storten in monodeponie wordt zelfs uitgegaan van een afschuifsterkte van 50 kN/m^2 . Behalve voor de afschuifsterkte zullen in het Duitse onderzoek verder criteria worden geformuleerd voor het drogestofgehalte (minimaal 35%) en de hoeveelheid slib in relatie tot de hoeveelheid huishoudelijke afvalstoffen (10 à 15 volumeprocenten zuiveringsslib), afhankelijk van de stortmethode.

In de Nederlandse situatie kan op basis van de huidige praktijk worden uitgegaan van het storten van zuiveringsslib op stortplaatsen voor huishoudelijke afvalstoffen en daarmee te verwerken bedrijfsafval. In de praktijk worden reeds door stortbeheerders beperkingen gesteld aan de dagelijkse aanvoer (10 volumeprocent zuiveringsslib).

In deze situatie worden geen specifieke eisen gesteld, anders dan de normale eisen volgens de Richtlijn "Gecontroleerd Storten". Deze volumebeperking - welke dus geen nadere eisen stelt aan de afschuifsterkte en/of de draagkracht - zou als stortbaarheidscriterium kunnen worden gehanteerd. Indien echter het aandeel van zuiveringsslib in de dagelijkse aanvoer van een stortplaats groter wordt dan 10 volumeprocent, moeten aanvullende eisen aan het slib worden gesteld. In deze situaties is er geen aanleiding om af te wijken van de in COST-verband ontwikkelde aanbeveling.

De afschuifsterkte zou door middel van een motorvinsonde moeten worden bepaald in een monster dat in een monsterhouder is aangebracht en verdicht. De wijze van verdichten en meten moet op een standaardwijze plaatsvinden om tot onderling vergelijkbare meetwaarden te komen. In bijlage 4 is een daartoe dienend voorschrift opgenomen.

Voor de draagkracht kan op basis van dit onderzoek geen richtwaarde worden vastgesteld.

Mogelijk kan in de toekomst - overeenkomstig het in de Bondsrepubliek uitgevoerde onderzoek - op basis van metingen een correlatie worden vastgesteld tussen de afschuifsterkte en de draagkracht. Een andere mogelijkheid is - tot meer duidelijkheid is verkregen door middel van metingen - een maximale indringing van 5 mm te stellen bij een belasting van 50 kN/m² te meten met een laststempel.

8 VERHOOGING AFSCHUIFSTERKTE ZUIVERINGSSLIB

8.1 Methoden

Uit de experimenten van dit onderzoek blijkt dat ontwaterde slibben - waaraan niet meer toeslagmiddelen zijn toegevoegd dan noodzakelijk voor een voldoende conditionering - een relatief lage afschuifsterkte hebben bij drogestofgehaltes tot ongeveer 25%.

Momenteel is een nieuwe generatie ontwateringsapparatuur in ontwikkeling waarbij een betere ontwatering bij een lager verbruik van conditioneringsmiddelen wordt bereikt.

Otte-Witte¹⁶ bepaalde de afschuifsterkte bij verschillende vormen van conditionering en ontwatering door middel van zeefbandpersen en filterpersen.

De resultaten van zijn onderzoek zijn samengevat in tabel 8.

conditionering	zeefbandpers		filterpers	
	d.s. %	Su (kN/m ²)	d.s. %	Su (kN/m ²)
polymeren	20-30	<10		
polymeren	28-40*	5-18	23-42	9-32
metaalzouten + kalkhydraat	25-45	5->100		
hoogthermisch	40-50	10-55	>50	50-100
polymeren + reactieve toeslagstof	30-50	5->100		
polymeren + niet reactieve toeslagstof	28-40	0-10		
voorbekalken + polymeren	25-40 30-50	5-20		
polymeren pelleten + compacteren	+ 45-65 50-80	>30		

Tabel 8. Drogestofgehaltes en afschuifsterktes bij verschillende vormen van conditioneren en ontwateren (16a)

(* = nieuwste generatie ontwateringsapparatuur)

De gangbare wijze van conditioneren met polymeren en ontwatering door middel van zeefbandpers of centrifuge levert geen eindprodukten met een afschuifsterkte van minimaal 15 kN/m². Met voldoende kalk geconditioneerd zuiveringsslib, ontwaterd met een filterpers, kan wel een voldoende afschuifsterkte hebben. De afschuifsterktes van dergelijke slibben zullen pas significant toenemen door toevoeging van hulpstoffen of door een aanvullende bewerking zoals bijvoorbeeld composteren (biologisch drogen) of zwartegrondbereiding.

Loll²⁴ onderzocht de toename van de afschuifsterkte van zuiveringsslib en drinkwaterslib door het toevoegen van ongebluste kalk, zaagmeel, vliegass, zand en mengsels daarvan.

Uit de resultaten van deze experimenten, de figuren 15, 16, 17 en 18 blijkt dat het toevoegen van ongebluste kalk het meest effectief is. Het toevoegen van zand geeft het minste effect.

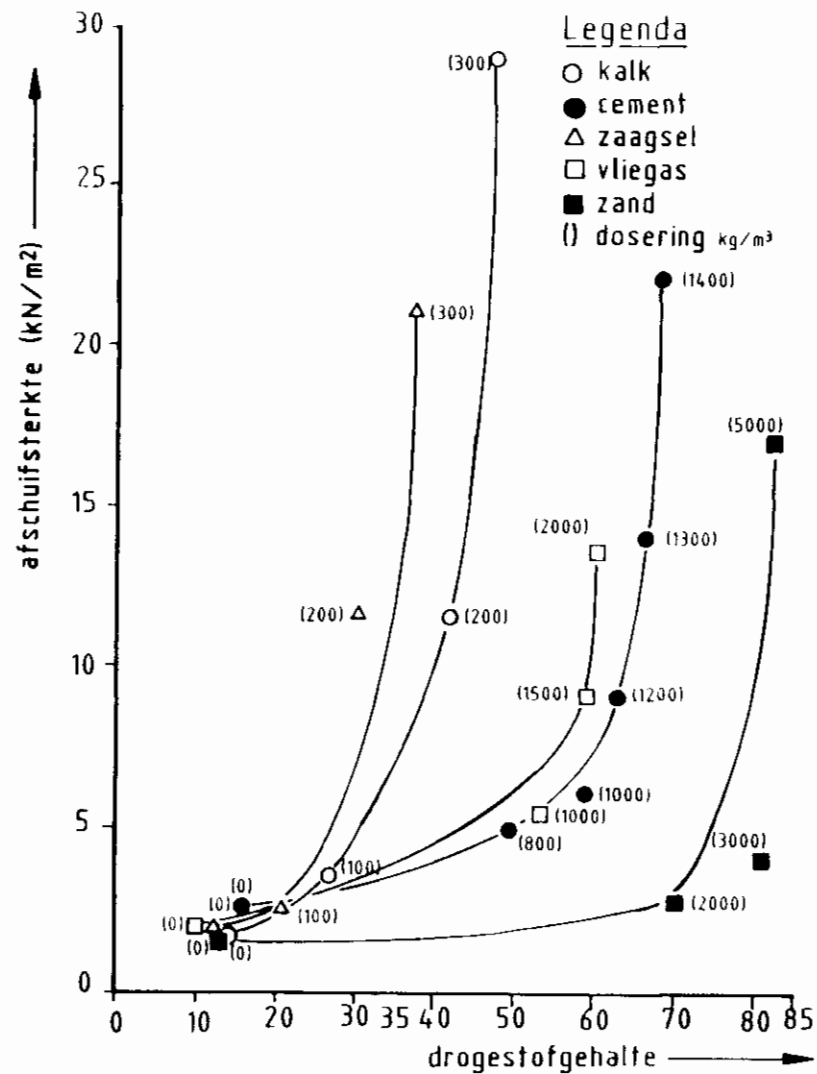
In een project van het Nationaal onderzoekprogramma kolen⁴ is onderzoek gedaan naar de toename van de afschuifsterkte van zuiveringsslib door het toevoegen van:

- ongebluste kalk;
- Lurgikalk;
- vliegass en bedas van een wervelbedverbrandingsinstallatie;
- vliegass;
- zand.

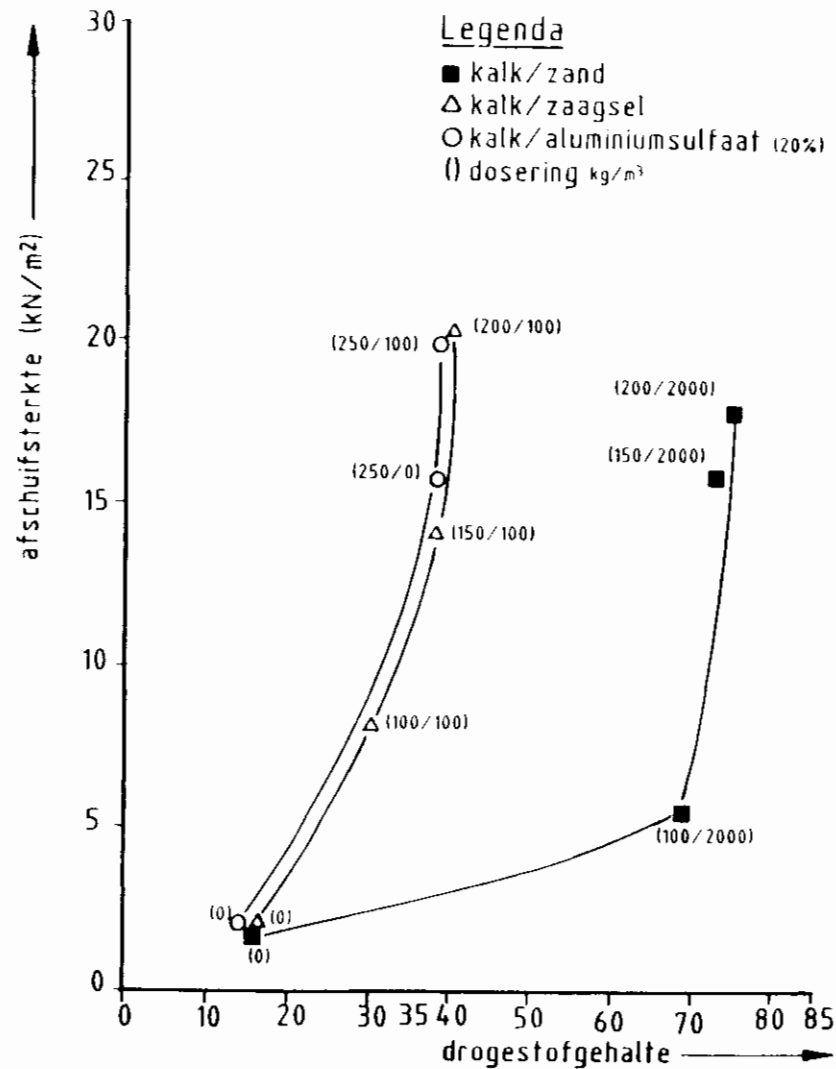
Het betreffende zuiveringsslib was afkomstig van de r.w.z.i.-Harderwijk, geconditioneerd met polymeren en ontwaterd met behulp van een zeefbandpers tot een drogestofgehalte van 20%. In tabel 9 zijn de verhoudingen vermeld tussen slib en toeslagmateriaal, het na menging bereikte drogestofgehalte, de gloeirest en de afschuifsterkte. De laatste werd bepaald met een handvinsonde. De resultaten zijn weergegeven in figuur 19.

Voor de afschuifsterkte werd geconcludeerd dat:

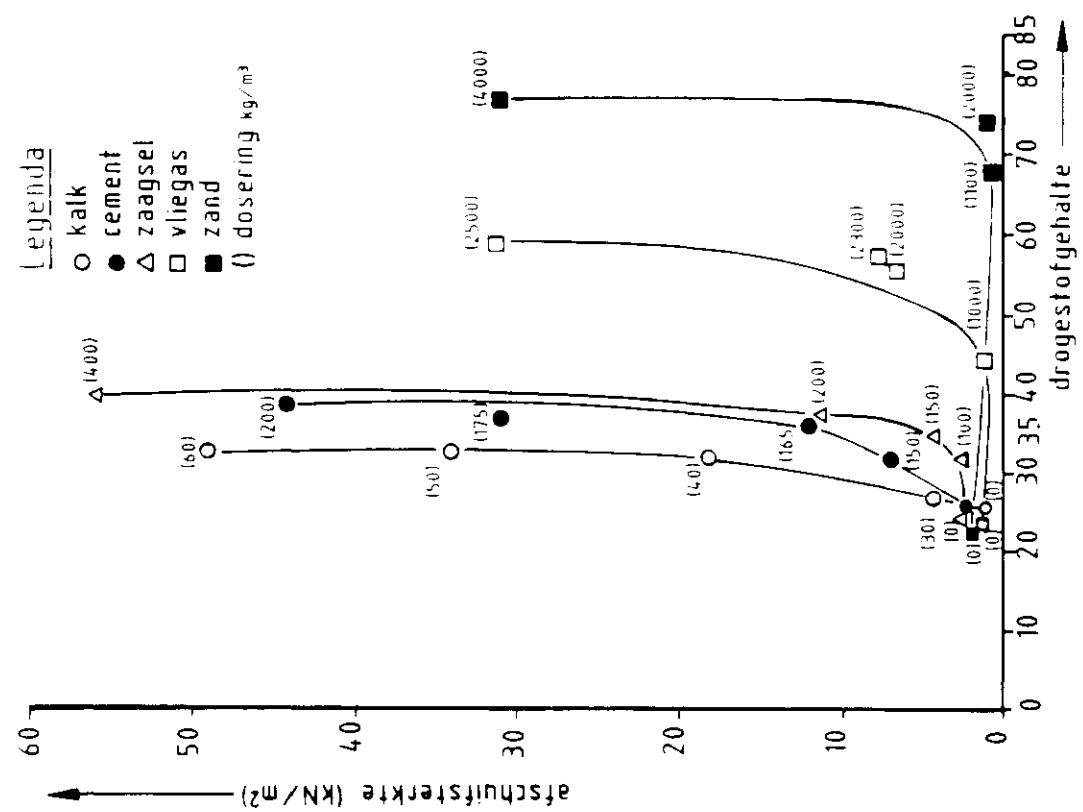
- er geen goede correlatie werd gevonden tussen het werkzaam CaO-gehalte en de afschuifsterkte;
- er geen duidelijke verschillen ontstaan in de afschuifsterkte bij het gebruik van hoogwaardige dan wel laagwaardige kalksoorten als toeslagmateriaal;
- kalkhoudende assoorten uit wervelbedverbrandingsinstallaties na menging met zuiveringsslib de afschuifsterkte van het slib verhogen;
- grove bedas van verbrandingsinstallaties een toename bewerkstelligt van de afschuifsterkte van slib wanneer deze as met slib wordt vermengd. Door de bedassen te vermalen zou deze bijdrage aan de afschuifsterkte nog kunnen worden verhoogd;
- vliegassen uit poederkoolgestookte installaties na menging met zuiveringsslib weinig of niet bijdragen aan de afschuifsterkte;
- zand na menging met zuiveringsslib weinig of niet bijdraagt aan de afschuifsterkte.



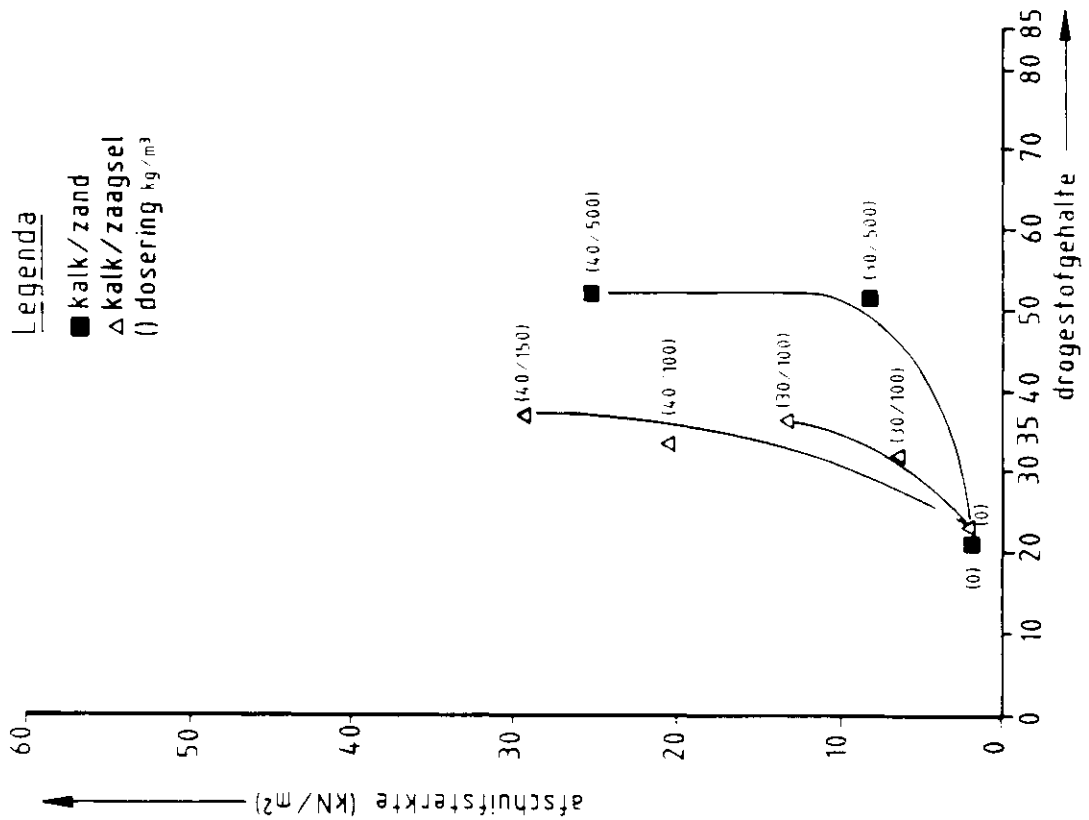
Figuur 15. S_u als functie van het drogestofgehalte bij toelagstoffen (zuiveringsslib)



Figuur 16. S_u als functie van het drogestofgehalte bij toevoegen van mengsels (zuiveringsslib)



Figuur 17. So als functie van het drogestofgehalte bij toestagstoffen (drinkwaterslib)



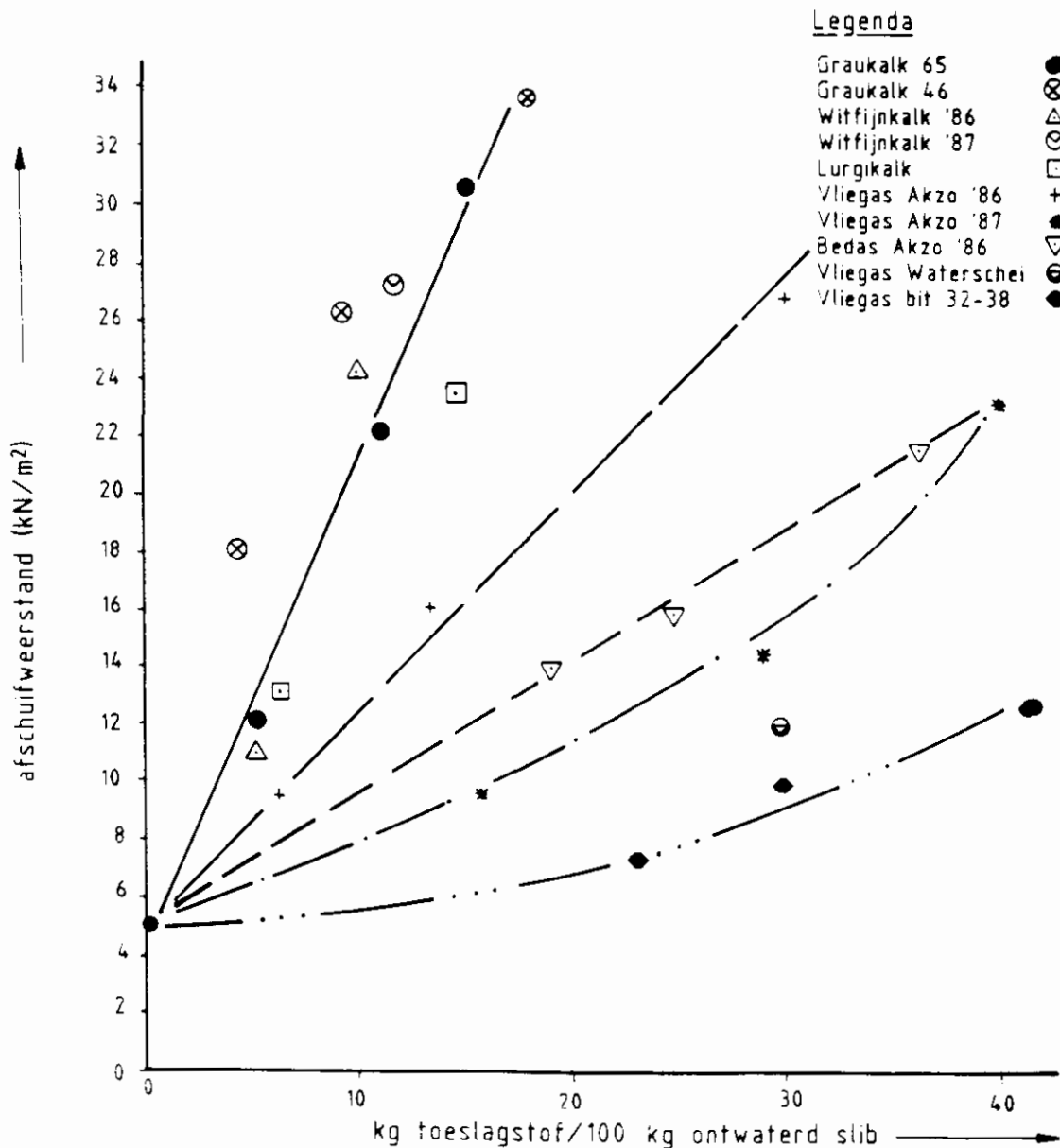
Figuur 18. So als functie van het drogestofgehalte bij toevoegen van mengsels (drinkwaterslib)

toeslagstof	kg toeslag/ 100 kg slib	drogestof- gehalte %	gloeirest. %	afschuif- weerstand kN/m ²
graukalk 65	0	20,28	43,00	5
	5,5	-	-	12
	11	31,43	58,11	22
	15	33,96	61,95	31
graukalk 46	0	19,50	42,65	5
	4	25,30	51,83	18
	9,5	30,50	59,95	26
	17,5	37,22	67,88	34
witfijn kalk '86	5,5	26,85	53,99	11
	10	28,90	57,24	24
witfijn kalk	12	-	-	26
lurgikalk	0	18,81	46,94	5
	6,5	27,40	58,74	13
	15	34,27	61,88	23
vliegas Akzo '86	0	21,56	45,82	-
	6	21,74	56,61	9,5
	13	35,65	60,00	16
	30	48,80	64,74	27
vliegas Akzo '87	16	37,04	70,18	9,5
	29	44,87	75,98	14,5
	40	52,62	80,16	23
bedas Akzo '86	19	39,83	72,09	14
	24	45,79	76,47	16
	36	48,69	81,02	22
vliegas waterschei	30	-	-	12
vliegas bit 32-38	23	39,73	76,20	7,5
	30	44,35	80,37	10
	42	55,37	86,32	13,5
zand	30	36,28	-	7
	40	40,90	-	6
	50	44,10	-	6

Tabel 9. Afschuifweerstand van slib met verschillende toeslagstof-
fen⁴

Om een afschuifsterkte van 20 kN/m^2 te krijgen moest aan het zuiverings-slib circa 10% ongebluste kalk, 20% zeer kalkrijke vlieg-as of 35% ongemalen wervelbed-bodemas of wervelbedvlieg-as worden toegevoegd.

In het algemeen kan worden geconcludeerd dat toeslagmaterialen die een wezenlijke toename van de afschuifsterkte in het slib bewerkstelligen, een min of meer reactief karakter moeten hebben. Materialen zoals zand en zaadmeel bezitten deze eigenschappen niet of nauwelijks. Lok vlieg-assen afkomstig van poedergestookte installaties blijken slechts in grote hoeveelheden een significante toename van de afschuifsterkte te geven. Hierdoor zal het te storten volume sterk toenemen. Om deze reden worden deze materialen minder geschikt geacht als toeslagmateriaal voor verbetering van de stortbaarheid van slib.



Figuur 19. Toename S_u als functie van de hoeveelheid toeslagstof⁴

Een mogelijk probleem bij het toevoegen van reactieve toeslagmaterialen zoals kalk is het vrijkomen van ammoniak. Dit verschijnsel komt (ook) voor bij de conditionering met kalk en ijzerchloride. De vrijkomende ammoniak zal in ieder geval leiden tot een verhoging van de geurbelasting.

In het bovenstaande is aangenomen dat aan het ontwaterde slib speciaal een toeslagstof wordt toegevoegd met als enig doel de afschuifsterkte van het slib te verhogen of de draagkracht te verbeteren. Voor een indicatie van de kosten geldt onderstaande berekening. In plaats van dergelijke speciale toevoegingen kan als toeslagmateriaal ook gebruik worden gemaakt van stoffen die in ieder geval al een stortbestemming hebben. Te denken valt daarbij aan grond van bodemsanering, industriële afvalstoffen en shredder. Door het slib ter plaatse te mengen met dergelijke stoffen, zal de weerstand van het stortlichaam tegen afschuifkrachten en de draagkracht toenemen. De kosten worden in dat geval in belangrijke mate bepaald door het mengen.

8.2 Kosten

De kosten verbonden aan de verbetering van de stortbaarheid bestaan uit:

- investeringskosten voor de opslag en dosering van het toeslagmateriaal;
- aankoop en transport van toeslagmateriaal;
- energie, bediening en onderhoud.

De keuze van een toeslagstof wordt bepaald door de prijs; deze zal voor afvalstoffen die geen hergebruiksmogelijkheden hebben lager liggen dan voor stoffen die nuttig kunnen worden toegepast. Daarnaast spelen lokale of regionale factoren een rol. Het is daarom niet mogelijk voor alle toeslagmaterialen actuele prijzen te noemen. Om toch een kostenindicatie te kunnen geven, zijn alleen die toeslagmaterialen in beschouwing genomen waarvan zeker is dat ze beschikbaar zijn.

Uitgangspunten bij de kostenberekening zijn:

- rioolwaterzuiveringsinrichting met capaciteit van 35.000 i.e.;
- conditionering met polymeren en ontwateren met behulp van een zeefbandpers tot een drogestofgehalte van 20%;
- slibproductie: 610 ton droge stof/jaar;
- toeslagstof : 310 ton/jaar à f 155,-/ton;
- aantal bedrijfsuren per week: 36;
- aantal bedrijfsuren per dag : 7;
- geïnstalleerd vermogen menginstallatie: 7,5 kW;
- energiekosten: f 0,25 à/kWh;
- investeringskosten voor opslag, doseer- en menginstallatie: f 200.000,-;

-	exploitatiekosten:		
*	aankoop en transport kalk 310 x f 155,-	= f	48.000,-
*	energiekosten 52 x 36 x 7,5 x f 0,25	= f	3.500,-
*	bediening/onderhoud	= f	15.000,-
*	kapitaallasten (afschrijving 15 jaar, rentepercentage 7%, annuïteitsbasis)	= f	22.000,-
		f	88.500,-
	Kosten per ton droge stof slib	f	145,-
	(alle getallen zijn afgerond)		

De toevoeging van toeslagstof zal het te storten volume doen toenemen en daardoor ook de transport- en stortkosten.

De kosten voor geurbehandeling zijn niet in beschouwing genomen. Geurbestrijding is in het algemeen op meerdere plaatsen binnen een inrichting van toepassing. Eventuele geurbestrijdingsmaatregelen zullen dan integraal worden toegepast.

LITERATUUR

- 1 Anoniem, Keramiek, Stichting Opleiding Keramici, De Stee, 2^e druk.
- 2 Anoniem, Fachausschusz der Abwassertechnischen Vereinigung und des Verbandes Kommunalen Städtereinigungsbetriebe, Klärschlammereinbau in Deponien, gemeinsame Ablagerung von Klärschlamm und Siedlungsabfällen; Der Städtetag 10, 1986
- 3 Lolin, F Characterisation de l'état physique des boues; Revue documentaire et bibliographique RH-82-31
- 4 Dekker, W Rapport nr. 37-81, ing-bureau Dekker
- 5 Dirksen, C. Bodemnatuurkundige veldmethoden, Vakgroep bodemkunde en plantvoeding, Landbouwuniversiteit Wageningen, 1986.
- 6 Doedens, Ablagerung des Klärschlammes auf Monodeponien - Entwicklung, Tendenzen; verslag van het ATV-seminar 26/27 mei 1987 "Ablagerung von Klärschlamm", Frankfurt
- 7 Gay, G.CH.W., Henke, K.F., Rettenberger, G., Tabasaran, O. Standsicherheit von Deponien für Hausmüll und Klärschlamm. Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 14, 1981.
- 8 Gerschler, L.T. Schlammverwertung oder Deponierung; Haus der Technik, Essen, 1987
- 9 Graig, R.F. Soil mechanics Van Nostrand Reinhold Compagny, 1978
- 10 Hansbu, B A new Approach tot the Determination of the Shear Strength of Clay by the Fall-Cone-Test. Proceedings of the Royal Swedisch Geotechnical Institute, No. 14, 1957.
- 11 Hoff, E Trockensubstanz - einziges Kriterium für die Deponierfähigkeit? Korrespondenz Abwasser, 6, 213-214, 1978.
- 12 Hooydonk, A.C.M. van, Hagedoorn, H.G. Het meten van rheologische eigenschappen, Voedingsmiddelentechnologie, 15, 1984.

- 13 Möller, U. Schlammuntersuchung und -charakterisierung als Grundlage der Schlammbehandlung und -beseitigung -- Wechselbeziehungen zwischen Schlammeneigenschaften und Schlammbehandlungsverfahren sowie der Beseitigung der Schlämme, Schlammbehandlung und Schlammabeseitigung, Schriftenreihe der ATV aus Wissenschaft und Praxis, Band 11, S.49-130 St. Augustin 1984.
- 14 Möller, U., Gay, CH.G., Kassner, W., Köhlhoff, D., Loll, U., Otte-Witte, R. Neudefinition der Deponierfähigkeit von Abwasserschlämmen, Teil 1, Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum, Band 6, Bochum 1985.
- 15 Nelson, T. The Principles of rheological measurement. Report of General Conference Bedford College, Univ. of London, Oct. 1946.
- 16 Otte-Witte, R. Optimierung der Klärschlamm-Entwässerung mit dem Ziel einer problemlosen Deponierung. Korrespondenz Abwasser, 11, 1071-1075, 1986.
- 16a Otte-Witte, R. Beeinflussung der Festigkeitseigenschaften der zu deponierenden Klärschlamm, Conference on sewage sludge treatment and use, Amsterdam, 1988
- 17 Salomo, Probleme bei der Ermittlung der Standsicherheit von Mülldeponien; Müll und Abfall 10, 1985
- 18 Skempton, A.W., Bishop, A.A. The Measurement of the Shear Strength of Soils. Geotechnique, Vol. 2, Nr. 2, 1950.
- 19 Spillmann, Beitrag zur langfristig standsicheren Konstruktion hoher Abfalldeponien Müll und Abfall H10 u.11/1980
- 20 Terzaghi, Peek, Soil mechanics and engineering practice
- 21 Verlinden, H.L., Bouma, J. Fysische bodemonderzoekmethoden, reeks bodembescherming, Ministerie VROM, 1983.

- 22 Werkgroep stortbaarheid zuiveringsslib COST681,
 Bijeenkomst Grontmij nv, De Bilt, 1988
- 23 Wolf, P. Neuschäfer, U.
 Langzeitverhalten eines zwischengelagerten
 Klärschläms, Abwassertechnik, Heft 1, 1987.
- 24 Loll, U.
 Characterization of the physical status of sludge
 with special regard to the depositing
 capabilities, 4th international Symposium
 "Processing and use of organic sludge and liquid
 agricultural wastes", Rome, 8-11 October 1985.
- 25 Geuzens, P.
 Vergelijkende studie betreffende bepalingen-
 methoden van slibstabilisatie en rheologische
 eigenschappen, SVW 1989-1.

BIJLAGE 1

STORTMETHODEN

1 STORTMETHODEN

1.1 Algemeen

In het algemeen kan onderscheid worden gemaakt tussen het storten van zuiveringsslib op een stortplaats voor huishoudelijke afvalstoffen en ermee te verwerken bedrijfsafval, en het storten in monodeponie. Bij het beschouwen van de stortmethoden wordt de monodeponie buiten beschouwing gelaten.

In de praktijk kan zuiveringsslib op verschillende wijzen in huisvuilstorten worden ingebouwd. Bij een slibaandeel van meer dan 10% ten opzichte van het overige afval dient echter met een specifieke inbouwtechniek en planning van de aanvoer rekening gehouden te worden, om de berijdbaarheid en de stabiliteit van het stort te waarborgen⁷.

Aan de inbouwmethoden worden in het algemeen de volgende eisen gesteld:

- a) de normale werkwijze op het stortfront, en met name de berijdbaarheid van het stortvak, mag zo min mogelijk worden beïnvloed;
- b) de stabiliteit van het stortlichaam op lange termijn moet zijn gewaarborgd;
- c) ophoping van gas en percolatiewater moet worden vermeden;
- d) een optimale verdichting van het afval en het slib moet mogelijk zijn;
- e) emissies afkomstig van het slib moeten zoveel mogelijk vermeden worden.

1.2 Stortmethoden

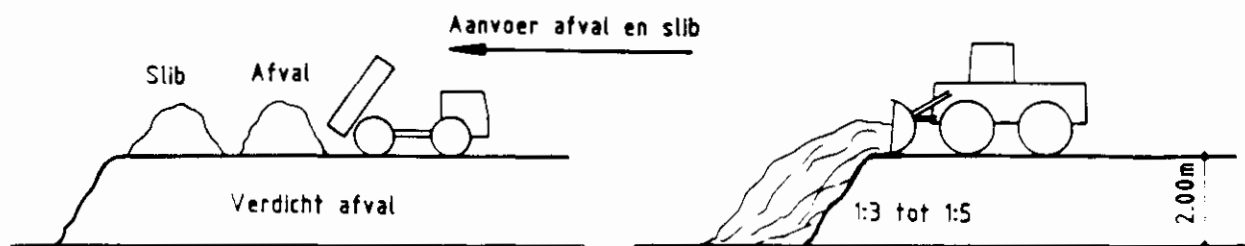
Gay⁷ onderscheidt voor het verwerken van slib op afvalstoffenstortplaatsen twee soorten stortmethoden:

- gezamenlijk storten en verwerken van afval en slib.
Afvalstoffen en slib worden gestort in één of twee niveaus en min of meer gemengd. Opgemerkt wordt dat, indien lagen slib en afvalstoffen, hoewel gescheiden aangebracht, in de tijd met elkaar kunnen vermengen, gesproken wordt van gemengd storten;
- gescheiden storten en verwerken.
Afvalstoffen en slib worden gescheiden op een stortplaats verwerkt, doch het slib wordt afgedekt met vaste afvalstoffen.

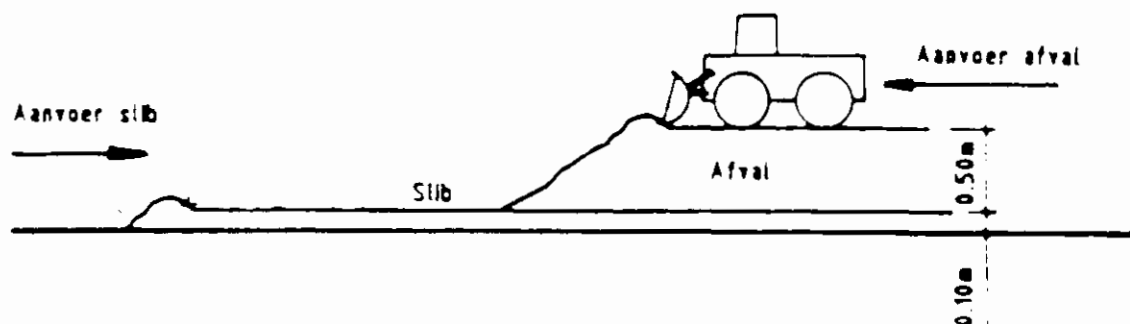
1.2.1 Gezamenlijk storten en verwerken van slib en afval

Gezamenlijk storten kan op drie wijzen plaatsvinden:

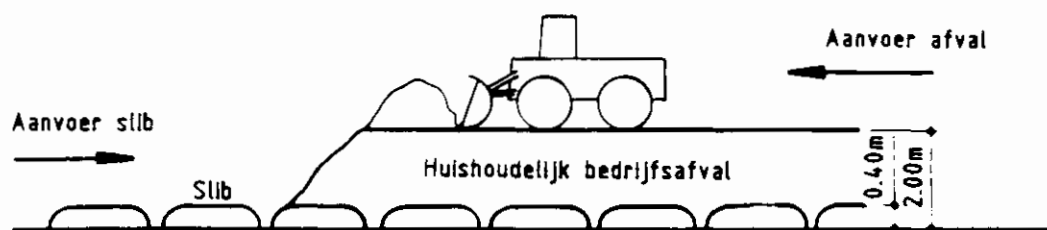
- inbouw als afval- slibmengsel.
Het slib en de afvalstoffen worden op het stortfront op hopen geplaatst om vervolgens te worden gemengd en langs het front te worden geëgaliseerd (figuur 20). De totale laagdikte bedraagt circa 2,0 m;
- inbouw van sliblagen.
Het slib wordt aan de onderkant van het stortfront gedeponeerd en geëgaliseerd.



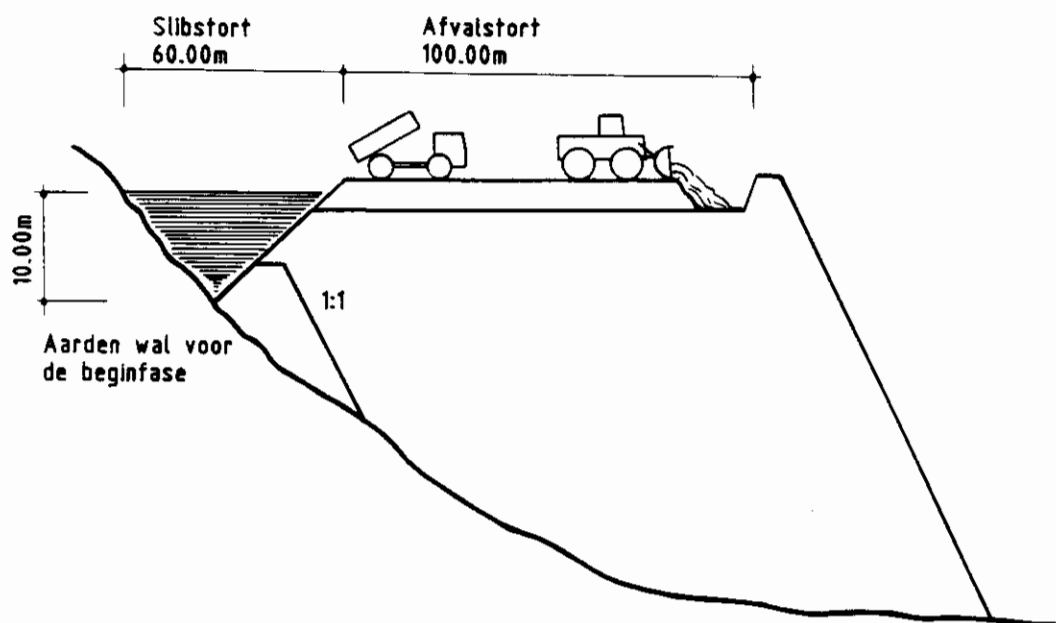
Figuur 20. Gezamenlijk storten op één niveau (volledig gemengd).



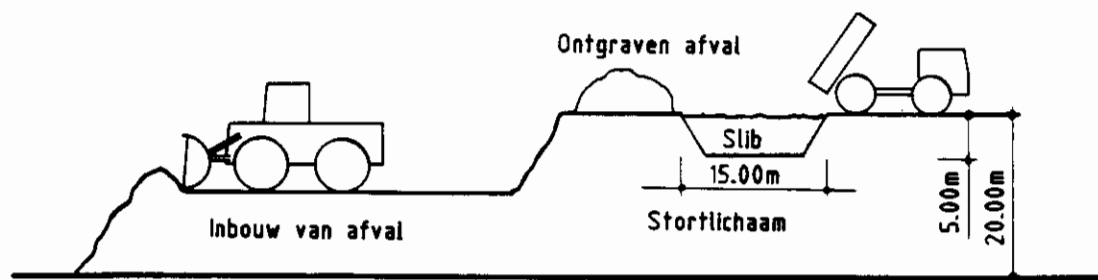
Figuur 21. Gezamenlijk storten van slib



Figuur 22. Gezamenlijk storten op twee niveaus met slibcassetten



Figuur 23. Gescheiden storten in dieptesleuven



Figuur 24. Gescheiden storten in bekkens

Vanaf de bovenkant van het stort wordt het afval over de sliblaag verspreid en verdicht tot een totale laagdikte van 0,5 m (figuur 21);

- inbouw van slibcassetten.

Het slib wordt in langgerekte strookvormige hopen of in hopen van beperkte afmetingen (cassetten) in het stortlichaam ingebouwd (figuur 22).

De langgerekte hopen kunnen zich over de gehele lengte van een stortvlak uitstrekken. De afstand tussen de einden van de stroken slib en de randen van het stort dient zo groot te zijn dat het slib ook na verdichting binnen het stortlichaam blijft. Tussen de stroken of hopen moet een afstand van minimaal anderhalf keer de breedte van de compactor aanwezig zijn om de compactor voldoende ruimte te geven het afval te verdichten.

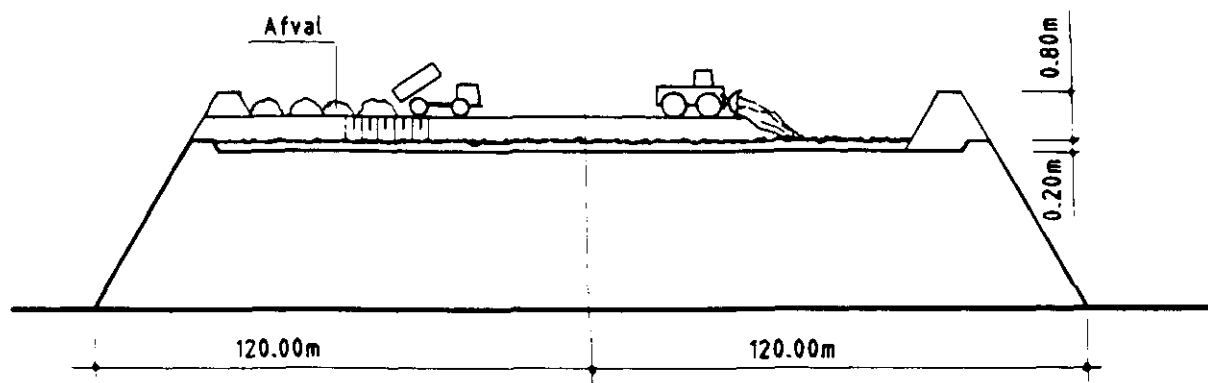
1.2.2 Gescheiden_storten_en_verwerken

- gescheiden storten van slib in diepe sleuven of putten in het stortlichaam. In geaccidenteerd terrein kan een sleuf of put worden gecreëerd door een wal aan te brengen van aanwezig materiaal (figuur 23). Het slib wordt vanaf het afvalstort in de sleuf of put gebracht;
- gescheiden storten van slib in grote cassetten. Indien slib in een latere fase wordt afgeleverd op een reeds bestaand stort bestaat de mogelijkheid het slib in de cassetten in het stort te brengen (figuur 24);
- gescheiden storten van slib door het aanbrengen van een slibtussenlaag. Voor het geval slib moet (na)drogen op een stort, wordt het slib in een dunne laag (0,2 m) op het stort uitgereden (figuur 25). Na 2 of 3 maanden, afhankelijk van het soort slibmengsel en het watergehalte, wordt de laag afgedekt met afval. Deze methode van storten vraagt relatief veel oppervlakte en wordt slechts incidenteel toegepast;
- gescheiden storten van slib langs storthellingen. Dikwijls wordt het slib voor optimaal gebruik van het stortoppervlak direct na aankomst of na enige tijd drogen in dunne lagen op het stortbovenvlak langs de storthellingen geschoven (figuur 26).

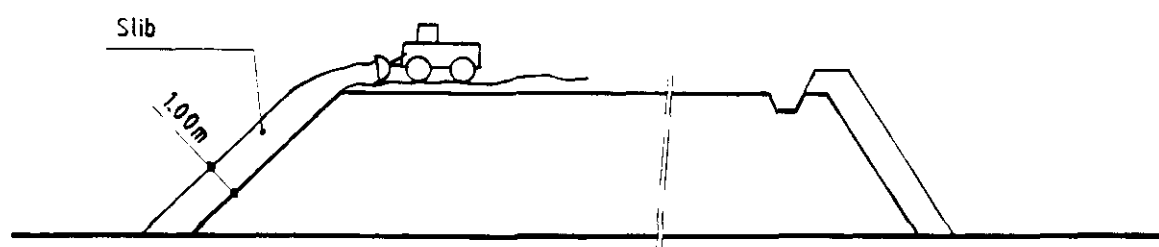
1.3 Vergelijking van de stortmethoden volgens Gay

De beoordeling van de verwerking van huishoudelijke afvalstoffen en slib berust op tal van factoren. Een overzicht van verschillende criteria wordt verschaft door Gay⁷. De met de stortproblematiek samenhangende factoren worden door hem onderscheiden in:

- bedrijfsvoering;
- berijdbaarheid;
- flexibiliteit;
- compactorcapaciteit;
- dichtheid;
- stortvolume;



Figuur 25. Gescheiden storten met natuurlijke ontwatering van slib
(tussenopslag)



Figuur 26. Gescheiden storten met natuurlijke ontwatering (tussenopslag)

	Bedrijfs-voering	berijdbaarheid	flexibiliteit	invloed op verwerkingscapaciteit	dichtheid stortlichaam	vereist stortvolume	vervuiling	esthetische hygiënische aspecten	stabiliteit stortlichaam	emissies
gezamenlijke verwerking	veel afstemming noodzakelijk		veel beperkingen						afhankelijk van volume-verhouding	
in kleine cassettes	omslachtig	goed	idem	nauwelijks	varieert	extra	gering	gunstig	gunstig	gering
in lagen	omslachtig extra werkgang	goed	idem	enigszins	varieert	extra	compactor	gunstig	slecht	nadelig, stagnant percolaat
volledig gemengd	eenvoudig	matig tot slecht	idem	aanzienlijk	neemt toe	nauwelijks extra	stortfront compactor	matig	tamelijk ongunstig	veel biogasvorming
gescheiden verwerking	weinig afstemming nodig		weinig beperkingen			extra	gering	slecht	afhankelijk van volume verhouding	in algemene zin ongunstig i.v.m. stank hinder
in diepe sleuven/putten	extra arbeidsrisico's, extra materieel-inzet	goed	idem	nauwelijks		extra	gering	slecht	gunstig, eventueel ongelijke zetting	kans op stagnant percolaat
als tussen opslag		goed	idem	nauwelijks	nauwelijks	extra	gering	slecht	slecht	idem
in grote cassettes	extra werkgang	goed	idem	enigszins	nauwelijks	extra	gering	slecht	slecht	idem

Tabel 10. Vergelijking van stortmethoden

- vervuiling;
- esthetische en hygiënische aspecten;
- stabiliteit en gas-, geur- en percolatiewateremissies.

De vergelijking zoals weergegeven in tabel 10 spreekt voor zichzelf met uitzondering van de kolom bedrijfsvoering. Bij gezamenlijke verwerking van slib en huisvuil zal een bepaalde mengverhouding tussen slib en huisvuil nodig zijn. De hoeveelheid slib, die kan worden verwerkt, moet worden afgestemd op de hoeveelheid huisvuil die wordt aangevoerd. Een dergelijke afstemming is bij gescheiden verwerking minder noodzakelijk.

Bij enkele aspecten van de genoemde stortmethoden kunnen nog de volgende opmerkingen worden gemaakt.

In het algemeen is uit oogpunt van bedrijfsvoering een gescheiden of afzonderlijke verwerking van slib eenvoudiger dan inbouw op één of twee niveaus. Met name vergt het storten op twee niveaus enige organisatie, daar de berijdbaarheid van het laagste niveau gewaarborgd moet zijn.

Wat berijdbaarheid betreft, heeft een gescheiden deponie enige voorkeur. Bij regen kan de berijdbaarheid van een gemengd stort aanzienlijk worden bemoeilijkt door de aanwezigheid van slib. Het benutten van de compactorcapaciteit is voor het gemengd storten van afvalstoffen en slib in één laag (niveau) gunstiger dan in twee lagen. Hoe dunner de afvallaag, des te groter de verdichting. Te dunne afdeklagen over sliblagen kunnen leiden tot het naar boven gedrukt worden van slib tijdens het compacteren. Hierdoor zal de berijdbaarheid geringer worden en de vervuiling van de omgeving groter.

Bij het verwerken van slib is de grondmechanische stabiliteit van een stortlichaam groter naarmate het mengsel slib-afval minder slib bevat en minder doorlopende sliblagen worden aangebracht.

BIJLAGE 2

GRONDMECHANISCHE MEETMETHODEN

GRONDMECHANISCHE MEETMETHODEN

1 Enige grondmechanische begrippen

1.1 Atterbergse grenzen

De vloeigrens (w_l) is de grens tussen het vloeibare en plastische gebied en wordt bepaald met behulp van het toestel van Casagrande, waarvan het principe in figuur 27 is aangegeven. De vloeigrens wordt gedefinieerd als het watergehalte, waarbij een in een schaalpje met grond getrokken V-vormige groef zich sluit als het schaalpje 25 maal van een hoogte van 10 mm op een harde ondergrond valt.

De uitrolgrens of plastische grens (w_p) vormt de overgang van de plastische fase naar de vaste fase. Deze grens wordt gedefinieerd als het watergehalte, waarbij draden van 3 mm dikte tijdens het rollen beginnen te kruimelen.

De plasticiteitsindex (I_p) is het verschil in watergehalte tussen de vloeigrens en de uitrolgrens. De grootte hiervan bepaalt dus de lengte van het plastisch gebied van een grondsoort.

De consistentie-index (I_c) is een parameter, die de positie van het natuurlijke watergehalte ten opzichte van de Atterbergsegrenzen weergeeft. In formule:

$$I_c = \frac{w_l - w}{w_l - w_p} = \frac{w_l - w}{I_p}$$

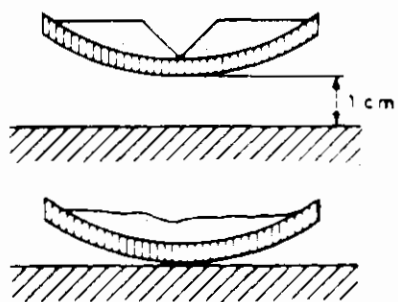
Wanneer het watergehalte de vloeigrens bereikt en I_c dus 0 wordt, verandert verkneeding de grond in een dikke viskeuse massa. Zodra het watergehalte onder de uitrolgrens komt en I_c groter dan 1 wordt, kan de grond praktisch niet meer worden verkneet.

Voor ongeroerde kleien met een consistentie-index nabij 0 varieert de ongedraineerde schuifsterkte van 15 tot 50 kN/m². Als de consistentie-index tot 1 nadert, kunnen deze waarden oplopen tot 250 kN/m².

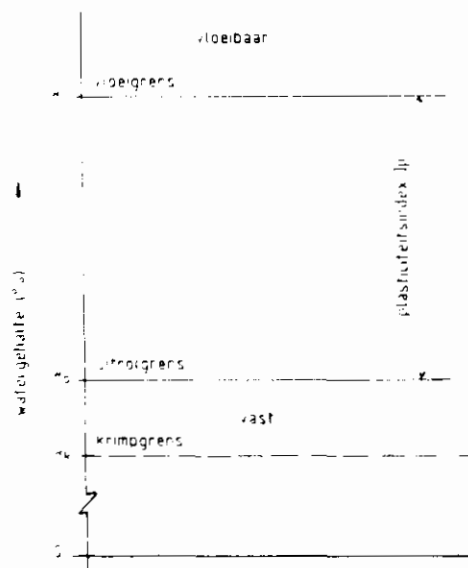
De krimprens (w_k) is het watergehalte, waarbij de grond, ondanks verder waterverlies door bijvoorbeeld verdamping, geen volumevermindering meer ondergaat.

Zodra deze grens wordt overschreden, wordt de kleur van de grond lichter. In het algemeen ligt het watergehalte bij de krimprens enige procenten lager dan de uitrolgrens.

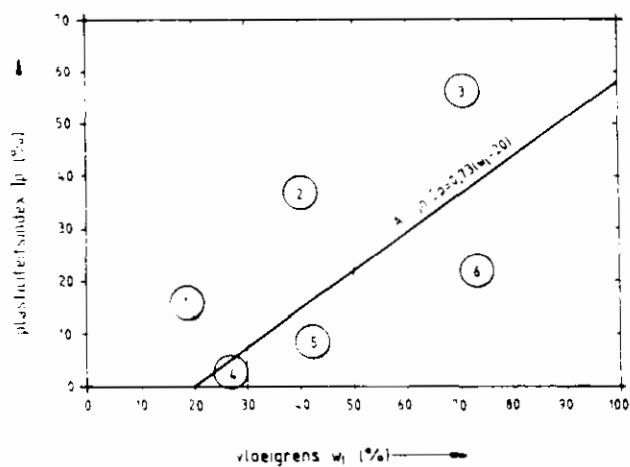
Figuur 28 bevat een schematisch overzicht van deze Atterbergse grenzen.



Figuur 27. Toestel van Casagrande



Figuur 28. Atterbergse grenzen



Figuur 29. Plasticiteitskaart

1.2 Plasticiteitskaart

Casagrande heeft door onderzoek vastgesteld, dat vele eigenschappen van cohesieve gronden, zoals samendrukbaarheid en consistentie gecorreleerd kunnen worden met de Atterbergse grenzen door middel van de plasticiteitskaart. In dit diagram (figuur 29), wordt de plasticiteitsindex uitgezet tegen de vloeigrens. Aan de hand van de positie van het punt in het diagram kan de grondsoort worden geklassificeerd en benoemd.

Het diagram is verdeeld in zes gebieden, drie boven de A-lijn en drie eronder. Alle punten, die behoren bij anorganische kleien liggen boven de A-lijn en alle punten voor anorganisch silt liggen daaronder. Daarom kan de groepsaanduiding van een niet organische grond eenduidig worden vastgesteld aan de hand van de plasticiteitsindex en de vloeigrens. Punten, die bij organische kleien behoren, liggen echter doorgaans in hetzelfde gebied als de niet-organische silten met een grote samendrukbaarheid, en punten voor organisch silt in het gebied van de niet-organische silten met een matige samendrukbaarheid.

Organische gronden kunnen gewoonlijk van niet-organische gronden worden onderscheiden door hun karakteristieke geur en hun donkergrijze of zwarte kleur.

In twijfelgevallen dient de vloeigrens zowel voor een ovendroog als een gewoon monster te worden bepaald. Wanneer de vloeigrens door droging met meer dan 30% afneemt kan de grond meestal als organisch worden geclassificeerd, hoewel in sommige gevallen andere componenten, zoals bijzondere kleimineralen, de vloeigrens ook kunnen verlagen. Verder is de droge sterkte van een grond met een hoog organisch-stofgehalte veel hoger dan die van grond met een laag organisch-stofgehalte.

Uit ervaring blijkt, dat punten, die behoren bij monsters uit één bodemlaag, op een lijn liggen die vrijwel evenwijdig loopt aan de A-lijn. Bij toenemende vloeigrens nemen ook de plasticiteitsindex en de samendrukbaarheid van de grond toe.

2 Meetmethoden

2.1 gedraineerde_schuifsterkte

Directe schuifproef

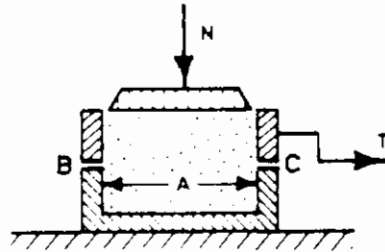
Bij de directe schuifproef, waarvan het principe is weergegeven in figuur 30, bevindt het grondmonster zich tussen twee getande platen. Op de bovenzijde wordt een verticale kracht aangebracht. Daarna wordt het monster door een toenemende horizontale kracht geleidelijk tot afschuiving gebracht, waarbij de vervormingen worden geregistreerd. De proef wordt herhaald bij andere verticale belastingen, zodat de waarden voor ϕ' en c' kunnen worden bepaald.

De proef kan worden uitgevoerd op droge of verzadigde monsters. In het laatste geval wordt het toestel in een bak met water geplaatst.

De belasting moet dan zo langzaam worden aangebracht, dat geen wateroverspanningen optreden.

De schuifproef heeft als nadeel, dat de plaats van het schuifvlak vooraf vastligt. Voorts is de spanningstoestand in het monster niet geheel bekend, terwijl aan de randen verstoringen mogelijk zijn.

Deze (oude) methode wordt weinig toegepast en blijft hier buiten beschouwing.



Figuur 30. Schuifproef

Triaxiaalproef

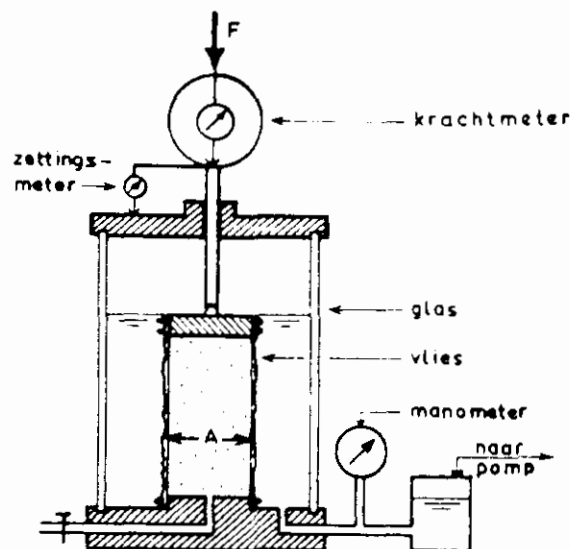
In de triaxiaalproef, waarvan de opstelling schematisch is weergegeven in figuur 31, wordt een cilindrisch grondmonster, omgeven door een membraan, via een verticale kracht tot afschuiving gebracht.

Hierbij bevindt het monster zich onder een alzijdige steundruk, die tijdens de proef constant wordt gehouden en die gelijk is aan de druk, waaronder het monster is geconsolideerd. Door uitvoering bij meerdere celdrukken (in de regel drie) kunnen ϕ' en c' uit de spanningstoestand bij bezwijken worden afgeleid.

De triaxiaalproef wordt over het algemeen toegepast op droge of verzadigde grondmonsters, waarvan de hoogte circa 75 mm en de diameter 38 mm bedraagt. In het eerste geval dient het monster in een mal te worden geprepareerd onder de gewenste droge dichtheid. In het andere geval kan voor geroerde monsters dezelfde techniek worden toegepast, maar moet het monster voorafgaande aan de beproeving worden verzadigd. Wanneer ongeroerde monsters beschikbaar zijn, kunnen deze direct in de triaxiaalcel worden geplaatst en vindt zo nodig verzadiging plaats.

Voor de bepaling van de gedraineerde schuifsterkte zijn twee uitvoeringswijzen van de triaxiaalproef toepasbaar:

- . de geconsolideerde gedraineerde proef, ook wel aangeduid als de "langzame proef";
- . de geconsolideerde ongedraineerde proef met meting van de waterspanningen, ook wel aangeduid als de "snelle proef".



Figuur 31. Triaxiaalproef

De langzame proef, waarbij tijdens de afschuiving wateroverspanningen de gelegenheid krijgen om af te stromen, wordt weinig toegepast, omdat er veel tijd mee gemoeid is. Voor droge monsters kan vanzelfsprekend altijd de snelle proef, zij het zonder meting van de waterspanningen, worden gebruikt.

Celproef

De celproef, waarvan de opstelling schematisch is weergegeven in figuur 32, vertoont veel overeenkomsten met de triaxiaalproef. De wijze van afschuiving verschilt echter, aangezien schuifspanningen worden geïntroduceerd door de celdruk te verminderen bij meerdere waarden van de verticale belasting.

Bovendien wordt de celproef (op verzadigde grondmonsters) altijd langzaam uitgevoerd, omdat geen waterspanningen in het monster kunnen worden gemeten.

In de praktijk wordt daarom meer van de triaxiaalproef gebruik gemaakt, die vergelijkbare uitkomsten geeft.

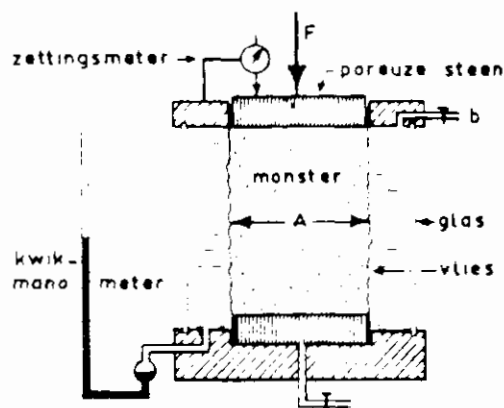
2.2 Ongedraineerde_schuifsterkte

Vrije-prismaproef

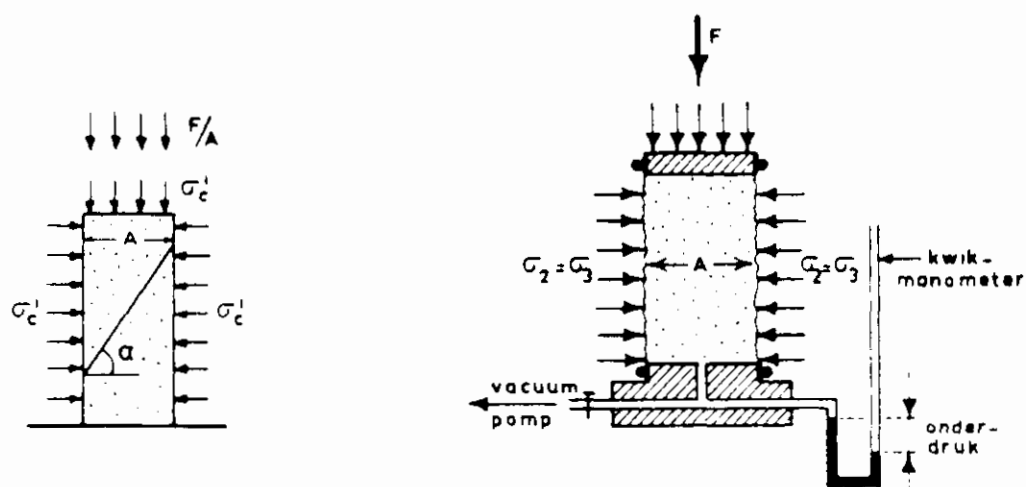
In de vrije prismaproef wordt een (cohesief) cilindrisch grondmonster zonder zijdelingse steundruk door een (relatief snel) toenemende verticale belasting tot afschuiving gebracht.

De hoogte en diameter van het monster verhouden zich hierbij als 2:1. Tijdens de proef wordt zowel de verticale kracht als de vervorming gemeten. De ongedraineerde schuifsterkte is gelijk aan de helft van de verticale spanning bij bezwijken.

De vrije-prismaproef kan alleen worden toegepast op ongeroerde grondmonsters, die een redelijke consistentie bezitten.



Figuur 32. Celproef



Figuur 33. Vrije-prismaproef

Triaxiaalproef

De ongedraineerde schuifsterkte kan ook worden bepaald met behulp van de triaxiaalproef. In dat geval wordt de proef ongedraineerd (en dus snel) uitgevoerd zonder het monster van te voren te consolideren. De resultaten van een dergelijke proef zijn vergelijkbaar met die van de vrije-prismaproef. In de triaxiaalproef kunnen echter ook relatief slappe monsters worden beproefd, omdat reeds een geringe celdruk voldoende zijdelingse steun geeft.

Vinsondeproef

Het vinsonde-apparaat, dat in het laboratorium wordt gebruikt voor de bepaling van de ongedraineerde schuifsterkte (de motorvinsonde), is weergegeven in figuur 34. Het grondmonster bevindt zich in een cilindrische houder, die onder de vin wordt geplaatst. Vervolgens wordt de vin in het monster gedrukt. Door de vin rond te draaien en het hiervoor benodigde maximale torsiemoment te meten, kan aan de hand van ijk-tabellen van de apparatuur de ongedraineerde schuifsterkte worden vastgesteld. Afhankelijk van de consistentie van het te beproeven materiaal kunnen verschillende vin-afmetingen worden toegepast. In het algemeen wordt de proef drie maal uitgevoerd op één monster om inzicht te verkrijgen in de spreiding van de meetwaarden.

De vinsondeproef kan worden toegepast op ongeroerde en geroerde monsters. In het eerste geval kan het monster in de steekbus of monster-ring blijven zitten, mits de diameter hiervan voldoende groot is ten opzichte van de vinafmetingen.

Geroerde monsters moeten laagsgewijs worden opgebouwd in een cilindrische houder. In Duitsland wordt hiervoor bij slibonderzoek een houder toegepast met een inhoud van circa 1,5 l (hoogte 150 mm, diameter 113 mm), zoals aangegeven in figuur 35.

Val-kegelproef

Een indirecte manier om de ongedraineerde schuifsterkte van grondmonsters te bepalen, bestaat uit de val-kegelproef, waarvan de opstelling in figuur 36 is weergegeven.

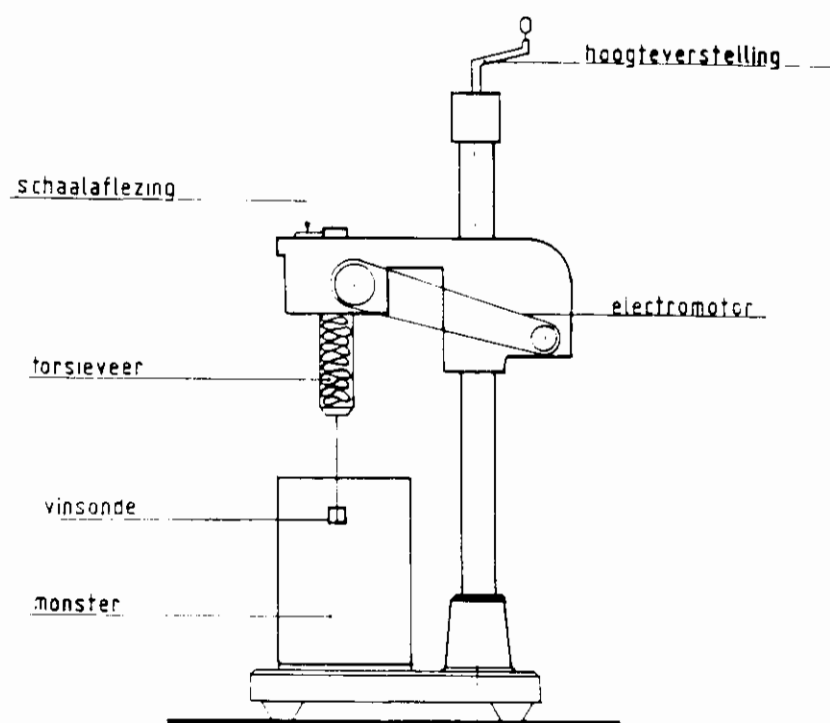
De proef wordt ook wel aangeduid met de benaming "valconus". Het monster bevindt zich in een cilindrische houder. Bij deze proef valt een kegeltje van een bepaalde hoogte op de bovenzijde van het monster en dringt hierin. De indringingsdiepte, die na vijf minuten wordt gemeten, is een maat voor de schuifsterkte en kan aan de hand van ijk-tabellen, behorend bij bepaalde kegelaafmetingen en gewichten, worden vastgesteld. Per monster wordt de proef meerdere malen uitgevoerd om een betrouwbaar resultaat te verkrijgen. Hiertoe wordt het monster op verschillende plaatsen gepenetreerd.

2.3 Overige proeven

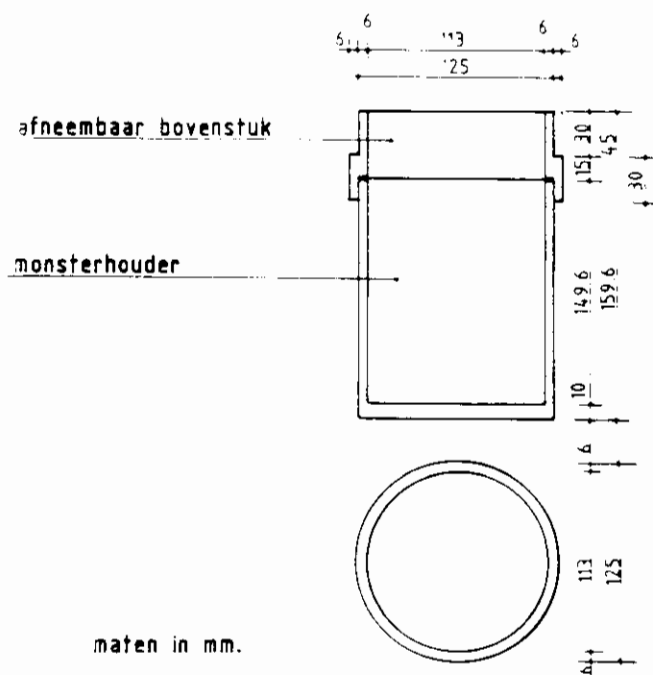
Voor de directe bepaling van de ongedraineerde schuifsterkte zijn ook kleinere handinstrumenten beschikbaar, zoals de torvane en de zakpenetrometer.

De torvane berust op het principe van het vin-apparaat, zij het dat de proef aan het oppervlak van het monster wordt uitgevoerd. De afmetingen van de vin kunnen worden afgestemd op de consistentie van het materiaal.

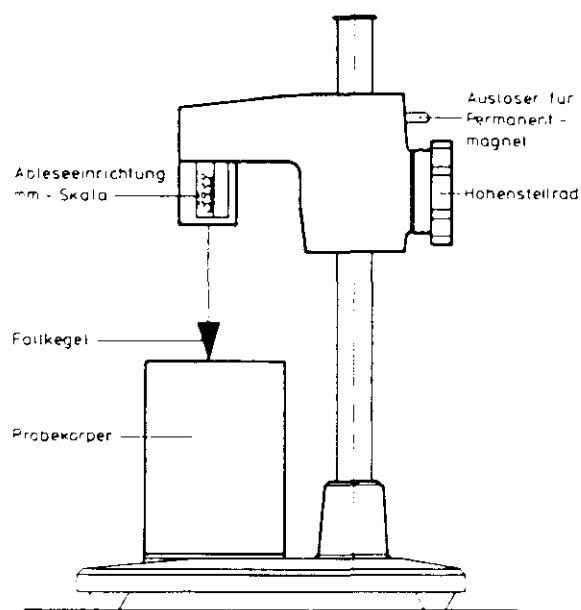
De zakpenetrometer wordt in een monster gedrukt. De benodigde kracht, die via een ingebouwde veer wordt overgebracht, is een maat voor de schuifsterkte.



Figuur 34. Vinsonde



Figuur 35. Monsterhouder van de vinsonde



Figuur 36. Val-kegelapparaat

Beide apparaatjes zijn zodanig geijkt, dat de ongedraineerde schuifsterkte direct kan worden afgelezen.

2.4 Samendrukbaarheid

De samendrukkingsconstante van grond wordt bepaald in een samendrukkingsproef. Hierbij wordt een 20 mm hoog monster in een stalen ring met een inwendige diameter van 50 mm gebracht.

Het geheel wordt onder water opgesteld, zodat het monster verzadigd kan raken. Vervolgens worden, met tussenpozen van één week, vier in grootte toenemende verticale krachten op het monster aangebracht. Bij elke belastingtrap wordt het zettingsverloop gemeten. Door de zettingen uit te zetten tegen de logarithme van de verticale spanning kan de samendrukkingsconstante worden bepaald.

Voor het bepalen van de klink zijn geen standaardproeven beschikbaar.

2.5 Draagkracht

Laststempelproef met het laststempelapparaat

Met de laststempelproef kan het draagvermogen van slib worden gemeten. Het laststempelapparaat, zoals weergegeven in figuur 37, is in de nulstand uitgebalanceerd met contragewichten.

De stempel, met een oppervlak van 1.000 mm^2 , wordt op het sliboppervlak neergezet en vervolgens belast met 1 tot 100 N. Na een belastings-tijd van 30 seconden wordt de indringingsdiepte afgelezen. Elk monster wordt minstens drie maal met verschillende gewichten belast. De indringingsdiepte moet minimaal 2 mm en mag maximaal 6 mm zijn. De relatie tussen gewicht en indringingsdiepte laat een belastingscurve zien, die het gedrag van verschillende materialen onder invloed van belastingen inzichtelijk maakt. Het draagvermogen wordt gedefinieerd als de belasting, waarbij de laststempel 4 mm in het materiaal dringt. Het draagvermogen wordt uitgedrukt in N/mm^2 of kN/m^2 . Duits onderzoek indiceert, dat het draagvermogen bepaald met de laststempelproef gemiddeld gelijk is aan circa 2,35 maal de ongedraineerde schuifsterkte gemeten met het vinapparaat.

Laststempelproef met het Hildesheimer Prüfstempel

Het te onderzoeken materiaal wordt bij deze proef luchtvrij in een meetbeker gebracht, waarna een stempel met een nauwkeurig gedefinieerd oppervlak en gewicht op het materiaal wordt gezet. De indringingsdiepte van het stempel is een maat voor de consistentie.

Het principe van de Prüfstempel komt dus overeen met de laststempel met deze verschillen dat:

- de afmetingen van het apparaat groter zijn;
- de meetbeker groter is, waardoor randeffecten minder optreden;
- het gewicht van de stempel groter is, waardoor drukken van 10 tot 50 kN/m^2 mogelijk zijn;
- de stempel voor de meting kan worden gefixeerd;
- het oppervlak van de stempel corrigeert voor inhomogeniteit van het monster.

In figuur 38 is het apparaat schematisch weergegeven.

Ervaringen in Duitsland wijzen op een (voorlopig) grenswaarde van maximaal 5 mm indringdiepte bij een belasting van 50 kN/m^2 met de Hildesheimer Prüfstempel.

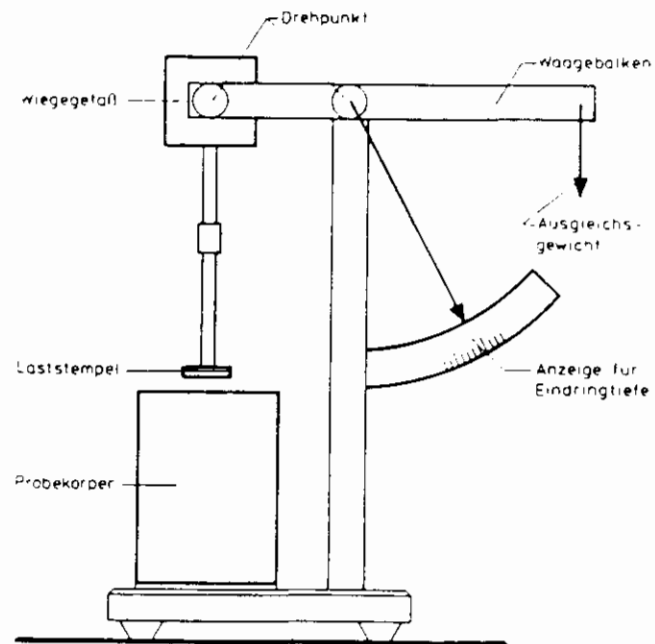
Meetmethoden in het veld

3.1 Classificatieproeven

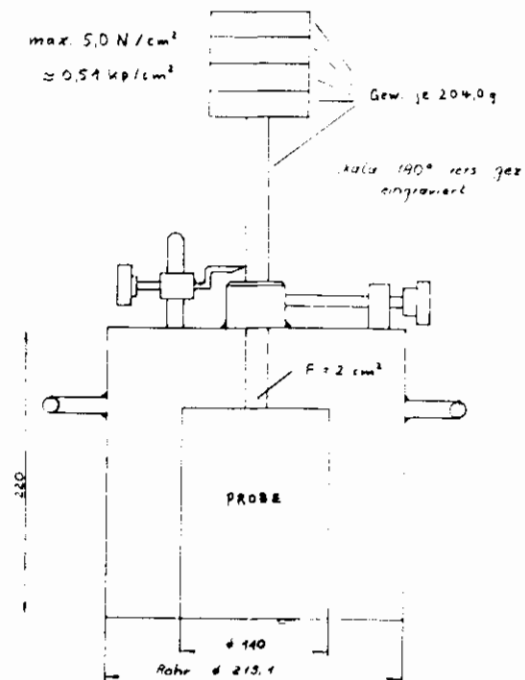
De korrelverdeling en het organisch-stofgehalte kunnen in het veld uitsluitend via een visuele beoordeling worden geschat. Directe metingen zijn niet mogelijk, evenmin als voor het watergehalte en de Atterbergse grenzen.

3.2 Gedraineerde schuifsterkte

Voor de directe meting van de effectieve sterkte-eigenschappen in het veld zijn geen methoden beschikbaar.



Figuur 37. Laststempel



Figuur 38. Hildesheimer Prüfstempel

3.3 Ongedraineerde_schuifsterkte

Vinsondeproef met de_handvinsonde

De in-situ-waarde van de ongedraineerde schuifsterkte kan worden bepaald met de handvinsonde. Het principe hiervan is gelijk aan dat van het eerder genoemde vinapparaat. De afmetingen zijn echter veel groter en de vin wordt met de hand weggedrukt en rondgedraaid. Om de proef op grotere diepten uit te kunnen voeren, dient zo nodig een gat te worden voorgeboord.

De schuifsterkte wordt aan de hand van ijktabellen, afgestemd op de vinafmetingen, vastgesteld. Voor natuurlijke gronden worden op de gemeten waarden correctiefactoren van 0,5 à 1,0 toegepast, afhankelijk van de plasticiteitsindex.

Met deze apparatuur wordt onder meer geëxperimenteerd bij de rioolwaterzuiveringsinrichtingen van Harderwijk en Rijen.

Penetrometer

Een indirecte manier om de ongedraineerde schuifsterkte in het veld te bepalen is het uitvoeren van een handsondering. Het handsondeerapparaat is weergegeven in figuur. De stang, die aan de voorzijde voorzien is van een conus, wordt in de grond gedrukt met een snelheid van circa 20 mm/sec.

De conusweerstand (uitgedrukt in MN/m^2 of kN/m^2) wordt door een wijzer op een schaalverdeling aangegeven. Afhankelijk van de conusafmetingen dient hierop een bepaalde correctiefactor te worden toegepast. De aflezingen kunnen discontinu om de 50 of 100 mm worden uitgevoerd. Er zijn echter ook typen, die een continue registratie van de conusweerstand geven. Dit zijn de zogenaamde penetrografen.

De conusweerstand als zodanig is een indicatie voor de vastheid van de ondergrond. In verzadigde gronden geldt echter bovendien, dat de ongedraineerde schuifsterkte gelijk is aan $1/20$ à $1/10$ van de conusweerstand. Met het handsondeerapparaat kan dus de orde van grootte van de ongedraineerde schuifsterkte worden vastgesteld.

BIJLAGE 3

MEETRESULTATEN

MEETRESULTATEN

Slibcode a: zeefbandpersslib
drogestofgehalte 15%
organisch-stofgehalte 75%

	gemiddeld	tolerantie	eenheid	opmerking
motorvinsonde*	1,5	0,1	kN/m ²	veer 1
motorvinsonde**	2,5	0,1		
handvinsonde	1,6	0	kN/m ²	vin a
handsondering	<2,5	0	kN/m ²	conus 8
val-kegelapparaat	1,1	0,1	kN/m ²	kegel 2
Hildesheimer Prüfstempel				
belasting 1 kN/m ²	18,7	1,5	mm	
belasting 2 kN/m ²	62,4	6,3	mm	
belasting 3 kN/m ²	80	0	mm	
belasting 4 kN/m ²	80	0	mm	
belasting 5 kN/m ²	80	0	mm	

Slibcode b1: centrifugeslib
drogestofgehalte 22%
organisch-stofgehalte 61%

	gemiddeld	tolerantie	eenheid	opmerking
motorvinsonde*	1,7	0,1	kN/m ²	veer 1
motorvinsonde**	3,0	1,5	kN/m ²	
handvinsonde	2,5	0,3	kN/m ²	vin a
handsondering	<2,5	0	kN/m ²	conus 8
val-kegelapparaat	2,1	0,3	kN/m ²	kegel 2
Hildesheimer Prüfstempel				
belasting 1 kN/m ²	24,4	2,1	mm	
belasting 2 kN/m ²	45,6	1,5	mm	
belasting 3 kN/m ²				
belasting 4 kN/m ²				
belasting 5 kN/m ²	80	0	mm	

Slibcode b2: gedroogd centrifugeslib
drogestofgehalte 25%
organisch-stofgehalte 56%

	gemiddeld	tolerantie	eenheid	opmerking
motorvinsonde*	7,8	1,3	kN/m ²	veer 4
motorvinsonde**	7,8	0,5	kN/m ²	
handvinsonde	9,5	0,9	kN/m ²	vin c
handsondering	73,8	2,9	kN/m ²	conus 7
val-kegelapparaat	16,6	2,4	kN/m ²	kegel 4
Hildesheimer Prüfstempel				
belasting 1 kN/m ²				
belasting 2 kN/m ²				
belasting 3 kN/m ²				
belasting 4 kN/m ²	3,4	1,1	mm	
belasting 5 kN/m ²	3,2	0,4	mm	

* = zonder monsterverdichting

** = met monsterverdichting

Slibcode c1: zeefbandpersslib + CaO
 drogestofgehalte 24%
 organisch-stofgehalte 35%

	gemiddeld	tolerantie	eenheid	opmerking
motorvinsonde*	10,3	2,0	kN/m ²	veer 1
motorvinsonde**	14,0	0,3	kN/m ²	
handvinsonde	7,4	0,6	kN/m ²	vin b
handsondering	31,2	3,9	kN/m ²	conus 8
val-kegelapparaat	14,8	2,4	kN/m ²	kegel 4
Hildesheimer Prüfstempel				
belasting 1 kN/m ²				
belasting 2 kN/m ²				
belasting 3 kN/m ²				
belasting 4 kN/m ²	3,0	0,	mm	
belasting 5 kN/m ²	8,6	0,9	mm	

Slibcode c2: gecompoteerd slib
 drogestofgehalte 56%
 organisch-stofgehalte 54%

	gemiddeld	tolerantie	eenheid	opmerking
motorvinsonde*	16,9	1,4	kN/m ²	veer 3
motorvinsonde**	17,5	2,0	kN/m ²	
handvinsonde	2,8	0,9	kN/m ²	vin b
handsondering	310	14,1	kN/m ²	conus 6
val-kegelapparaat	5,3	1,3	kN/m ²	kegel 3
Hildesheimer Prüfstempel				
belasting 1 kN/m ²	2,8	0,4	mm	
belasting 2 kN/m ²	7,8	0,8	mm	
belasting 3 kN/m ²	7,6	0,5	mm	
belasting 4 kN/m ²	6,4	0,5	mm	
belasting 5 kN/m ²	11,7	1,3	mm	

Slibcode c3: zeefbandpersslib
 drogestofgehalte 18%
 organisch-stofgehalte 68%

	gemiddeld	tolerantie	eenheid	opmerking
motorvinsonde*	3,2	1,5	kN/m ²	veer 1
motorvinsonde**	4,5	0,3	kN/m ²	
handvinsonde	3,2	0,1	kN/m ²	vin a
handsondering	<2,5	0	kN/m ²	conus 8
val-kegelapparaat	4	0,1	kN/m ²	kegel 3
Hildesheimer Prüfstempel				
belasting 1 kN/m ²				
belasting 2 kN/m ²				
belasting 3 kN/m ²	25,2	1,1	mm	
belasting 4 kN/m ²	37,8	0,8	mm	
belasting 5 kN/m ²	67,2	0,8	mm	

* = zonder monsterverdichting
 ** = met monsterverdichting

Slibcode d1: filterpersslib
drogestofgehalte 29%
organisch-stofgehalte 36%

	gemiddeld	tolerantie	eenheid	opmerking
motorvinsonde*	36,5	4,7	kN/m ²	veer 3
motorvinsonde**	30,5	2,0	kN/m ²	
handvinsonde	12,8	0,8	kN/m ²	vin c
handsondering	51,4	3,9	kN/m ²	conus 8
val-kegelapparaat	18,6	6,4	kN/m ²	kegel 3
Hildesheimer Prüfstempel				
belasting 1 kN/m ²				
belasting 2 kN/m ²				
belasting 3 kN/m ²				
belasting 4 kN/m ²	2,4	0,5	mm	
belasting 5 kN/m ²	5,8	0,4	mm	

Slibcode d2: filterpersslib
drogestofgehalte 40%
organisch-stofgehalte 30%

	gemiddeld	tolerantie	eenheid	opmerking
motorvinsonde*	34,2	4,1	kN/m ²	veer 3
motorvinsonde**	32,0	2,0	kN/m ²	
handvinsonde	26,3	1,3	kN/m ²	vin c
handsondering	179,5	45,4	kN/m ²	conus 7
val-kegelapparaat	60,4	42,5	kN/m ²	kegel 4
Hildesheimer Prüfstempel				
belasting 1 kN/m ²				
belasting 2 kN/m ²				
belasting 3 kN/m ²				
belasting 4 kN/m ²	1,5	0,4	mm	
belasting 5 kN/m ²	3,8	1,1	mm	

Slibcode e: filterpersslib
drogestofgehalte 29%
organisch-stofgehalte 63%

	gemiddeld	tolerantie	eenheid	opmerking
motorvinsonde*	20,5	2,2	kN/m ²	veer 3
motorvinsonde**	24,0	2,0	kN/m ²	
handvinsonde	8,1	0	kN/m ²	vin a
handsondering	46,3	9,6	kN/m ²	conus 8
val-kegelapparaat	33,2	4,1	kN/m ²	kegel 4
Hildesheimer Prüfstempel				
belasting 1 kN/m ²				
belasting 2 kN/m ²				
belasting 3 kN/m ²	5,9	0,5	mm	
belasting 4 kN/m ²	8,4	1,6	mm	
belasting 5 kN/m ²	9,8	0,4	mm	

* = zonder monsterverdichting
** = met monsterverdichting

Slibcode f: natuurlijk ontwaterd slib
 drogestofgehalte 36%
 organisch-stofgehalte 38%

	gemiddeld	tolerantie	eenheid	opmerking
motorvinsonde*	13,1	4,7	kN/m ²	veer 1
motorvinsonde**	7,2	1,5	kN/m ²	
handvinsonde	11,5	0	kN/m ²	vin a
handsondering	44,6	8,1	kN/m ²	conus 8
val-kegelapparaat	18,8	3,6	kN/m ²	kegel 4
Hildesheimer Prüfstempel				
belasting 1 kN/m ²				
belasting 2 kN/m ²				
belasting 3 kN/m ²				
belasting 4 kN/m ²	5,5	1,8	mm	
belasting 5 kN/m ²	4,6	0,5	mm	

Slibcode g1: drinkwaterslib
 drogestofgehalte 32%
 organisch-stofgehalte 16%

	gemiddeld	tolerantie	eenheid	opmerking
motorvinsonde*	23,6	3,4	kN/m ²	veer 1
motorvinsonde**	23,6	2,0	kN/m ²	
handvinsonde	9,2	0	kN/m ²	vin a
handsondering	19,4	5,3	kN/m ²	conus 8
val-kegelapparaat	10,9	3,3	kN/m ²	kegel 3
Hildesheimer Prüfstempel				
belasting 1 kN/m ²				
belasting 2 kN/m ²				
belasting 3 kN/m ²				
belasting 4 kN/m ²	3,8	1,5	mm	
belasting 5 kN/m ²	26,6	0,9	mm	

Slibcode q2: drinkwaterslib
 drogestofgehalte 29%
 organisch-stofgehalte 25%

	gemiddeld	tolerantie	eenheid	opmerking
motorvinsonde*	17,9	3,5	kN/m ²	veer 1
motorvinsonde**	24,0	1,5	kN/m ²	
handvinsonde	5,5	0	kN/m ²	vin a
handsondering	46,3	9,6	kN/m ²	conus 8
val-kegelapparaat	10,5	4,5	kN/m ²	kegel 3
Hildesheimer Prüfstempel				
belasting 1 kN/m ²				
belasting 2 kN/m ²				
belasting 3 kN/m ²	5,6	1,8	mm	
belasting 4 kN/m ²	16,6	1,1	mm	
belasting 5 kN/m ²	20,2	7,6	mm	

* = zonder monsterverdichting

** = met monsterverdichting

BIJLAGE 4

MEETVOORSCHRIFT

MEETVOORSCHRIFT DRAAGKRACHT

Algemeen

De draagkrachtmetingen geven een indicatie van de indrukking van het materiaal onder invloed van een oppervlaktebelasting. Gebruik kan worden gemaakt van ieder willekeurig laststempel.

De monstervoorbereiding voor de draagkrachtmeting is hetzelfde als voor het bepalen van de afschuifsterkte.

Benodigdheden

- monsterhouder, stootplaat en proctorhamer zoals omschreven;
- laststempel.

Uitvoering van de meting

- de bovenzijde van het monster dient zo vlak mogelijk te zijn;
- blokkeer de belasting;
- plaats het laststempel op de oppervlak van het in de monsterhouder aanwezige materiaal;
- lees de nulstand af bij geblokkeerd laststempel;
- stel de belasting in op 50 kN;
- hef de blokkering op waardoor het monsteroppervlak wordt belast;
- lees de indrukking af op de tijdstippen 3 en 5 minuten na het aanbrengen van de belasting;
- de blokkering van de belasting wordt opgeheven waardoor het monsteroppervlak door het laststempel wordt belast.

MEETVOORSCHRIFT AFSCHUIFSTERKTE

Algemeen

De afschuifsterkte volgens de hierna beschreven methode geldt alleen voor cohesieve materialen.

De afschuifsterkte wordt gemeten met een motorvinsonde.

In een verdicht monster van het cohesieve materiaal waarvan men de afschuifsterkte wil bepalen, wordt een vin gebracht.

De vin is verbonden aan een torsieveen. Door een motor met een constante hoekverdraaiingssnelheid (10° per minuut)

wordt een koppel uitgeoefend op de vin. De vin wordt

meegenomen tot het moment dat afschuiving optreedt. De vin

springt dan terug. Van de geijkte veer is de relatie bekend

tussen de hoekverdraaiing (graden) en het moment (kN m).

De afschuifsterkte kan worden berekend volgens de formule:

$$S_u = \frac{M}{K} \quad [\text{kN/m}^2] \quad [1]$$

Hierin is:

M = maximale torsiemoment [kN m];

K = vinkarakteristiek volgens $\frac{\pi}{2} \cdot d^2 \cdot h \left(1 + \frac{d}{3h}\right)$ [m³];

d = diameter van afschuifcilinder = wijidte van de vin [m];

h = hoogte van de vin. [m].

Benodigdheden

- motorvinsonde;
Bij de motorvinsonde behoren:
 - * motor welke een constante hoekverdraaiing van 10° per minuut kan leveren
 - * (geijkte) torsieveren
 - * vin
- monsterhouder. Gebruik kan worden gemaakt van in de handel zijnde monsterhouders die worden gebruikt voor het uitvoeren van zogenaamde Proctor-proeven. Men kan echter ook een monsterhouder vervaardigen zoals weergegeven in figuur ;
- stootplaat met diameter gelijk aan de inwendige diameter van de monsterhouder;
- proctorhamer (valgewicht 2,5 kg, valhoogte 300 mm).

Uitvoering van de meting

- vul de monsterhouder door drie lagen materiaal met een dikte van ongeveer 100 mm per laag;
- na elke laag wordt de stootplaat aangebracht waarna met behulp van 10 slagen met de de proctorhamer het monster wordt verdicht;

- draai de vinsonde naar boven;
- plaats de monsterhouder onder de vinsonde;
- zet de aanwijzer van de torsieveer tegen de aanslag van de as;
- zet de afleesschaal op de nulstand;
- draai de vinsonde naar beneden. De vin dient daarbij in het midden van het monster te worden geplaatst; - zet de motor aan;
- de meting eindigt als de aanslag van de torsieveer weg springt;
- stop de motor;
- lees het aantal graden hoekverdraaiing af en herleid deze via de ijkgegevens van de veer tot het torsiemoment M ;
- reken de afschuifsterkte uit volgens formule [1].